

**TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY**



# Анализ динамики состояния здоровья хвойных деревьев по результатам дистанционного лесопатологического мониторинга

**И.А. Керчев: ведущий научный сотрудник, ИМКЭС СО РАН, к.б.н**

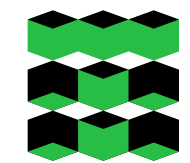
**К. Р. Мачука: аспирант ОИТ ТПУ**

**Н. Г. Марков: профессор ОИТ ТПУ, д.т.н**

XXIII Международная конференция

"Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса"

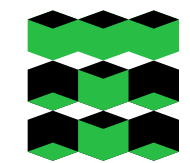
**12 ноября 2025**



# Актуальность

- Современное состояние многих лесных экосистем характеризуется массовыми очагами размножения стволовых вредителей хвойных деревьев. Поэтому сегодня актуальным является проведение оперативного лесопатологического мониторинга хвойных лесов.
- Существующие методы анализа результатов дистанционного лесопатологического мониторинга в виде снимков очагов часто дают только общую оценку площадей поражения и не позволяют отследить динамику состояния здоровья (жизненного состояния - виталитет) отдельных хвойных деревьев, это указывает на актуальность создания новых методов анализа снимков хвойных лесов, получаемых при дистанционном мониторинге.





# Цель работы

Разработка и исследование нового метода анализа динамики состояния здоровья (жизненного состояния) деревьев кедра *Pinus sibirica* в очагах размножения союзного короеда. Входными данными для этого метода являются результаты семантической сегментации (попиксельной классификации) разновременных снимков высокого и сверхвысокого разрешения, полученных при мониторинге кедровых лесов с помощью космических аппаратов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

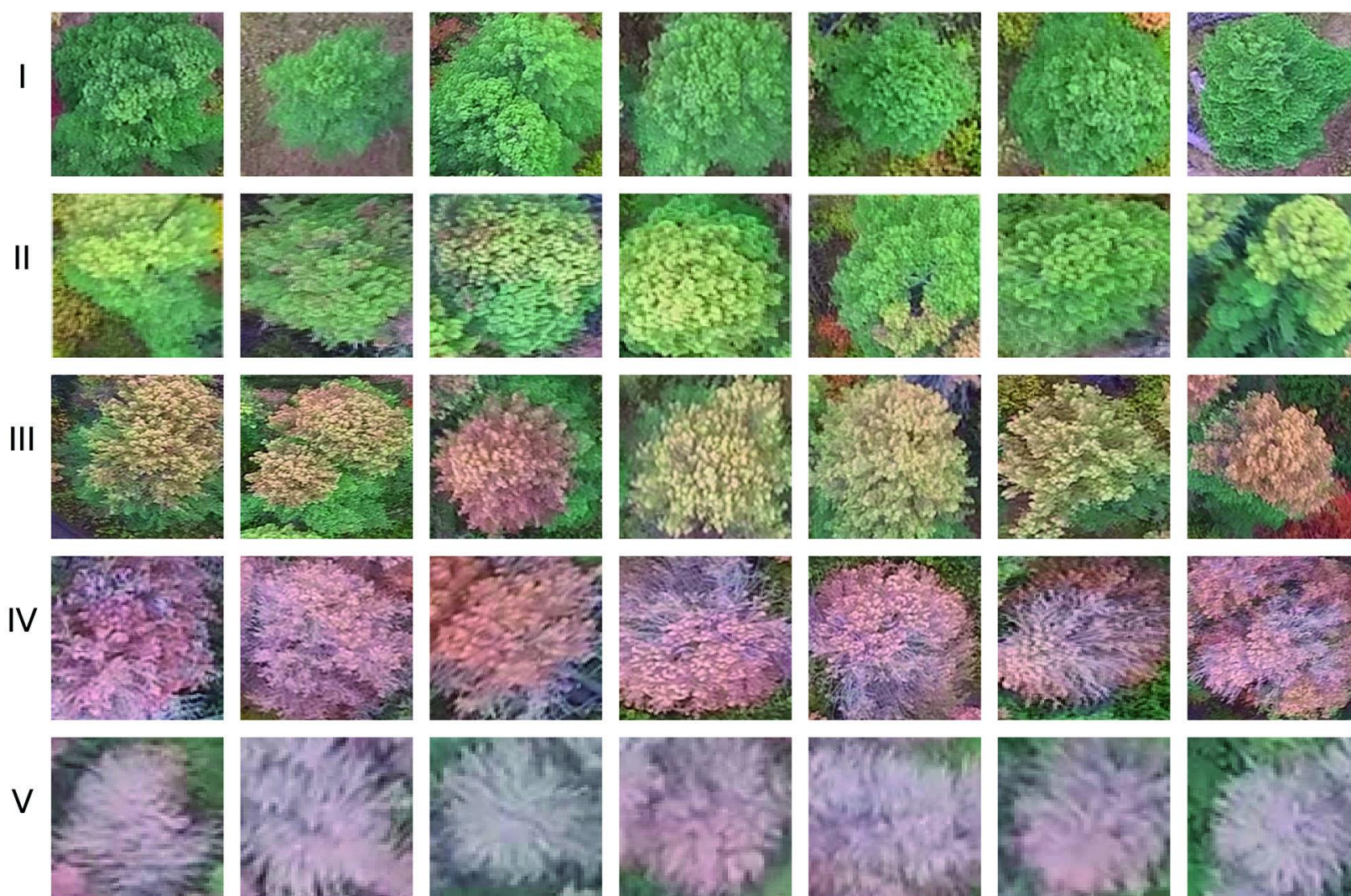
## Задачи

- Выбор модели сверточной нейронной сети и решение с помощью этой модели задачи мультиклассификации деревьев кедра на исходных разновременных снимках очага поражения кедра.
- Разработка метода анализа динамики и реализующего его алгоритма.
- Исследование эффективности предложенного метода анализа динамики виталитета хвойных деревьев на тестовом участке с использованием разновременных данных с БПЛА.



# Классы деревьев кедра

## RGB-снимки с БПЛА DJI P4



Мониторинг кедровых лесов поражённых вредителями проводился вблизи поселков Белоусово, Протопопово и Аксеново, находящихся в Томской области.

Классы (состояние) деревьев кедра, повреждённых **союзным короедом**:

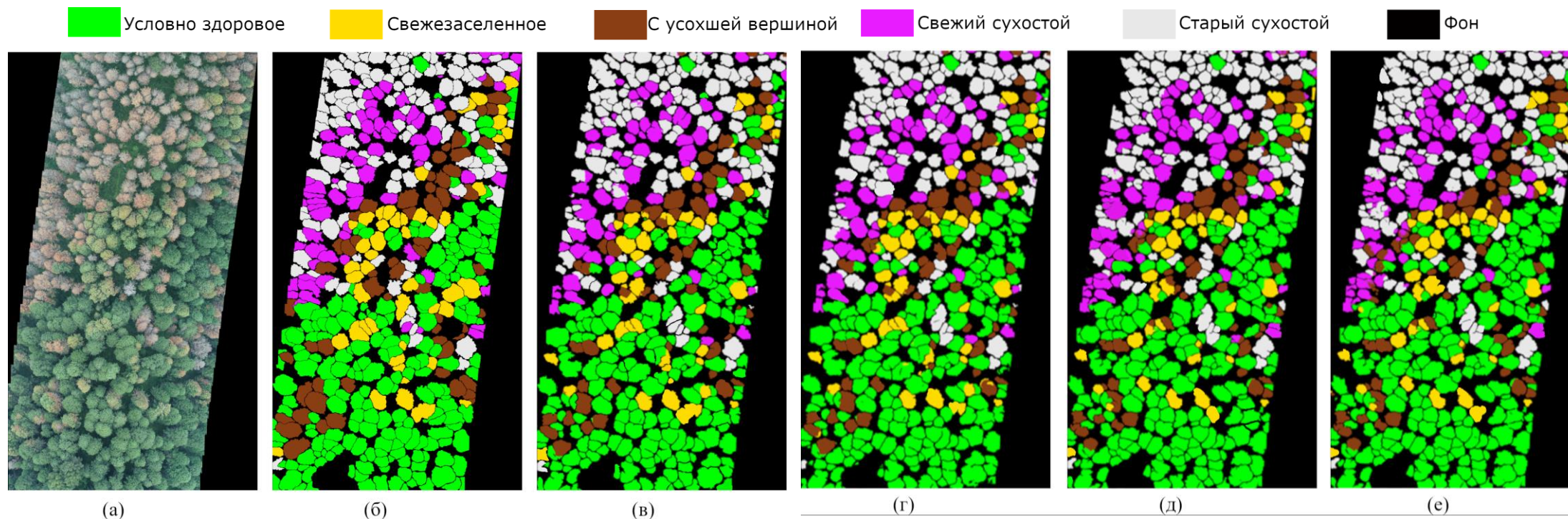
- I – Условно здоровое
- II – Свежезаселенное
- III – С усохшей вершиной
- IV – Свежий сухостой
- V – Старый сухостой



5 моделей нейронных сетей были разработаны нами и использовались при решении задачи семантической сегментации (попиксельной классификации) состояния здоровья деревьев кедра *Pinus sibirica*. Для обучения и тестирования моделей использовались снимки с БПЛА кедровых лесов, находящиеся вблизи поселков Протопопово и Аксеново.

Выбор модели осуществлялся на основе двух ключевых критериев:

1. Основным критерием являлась количественная оценка качества семантической сегментации с использованием метрики IoUc по классам деревьев и mIoU (среднее значение IoUc для всех классов), рассчитанной на тестовом участке. Высокое качество сегментации означает что IoUc и mIoU должно быть  $> 0.5$ .
2. Вторым критерием выступила скорость вычисления моделей. Поскольку при мониторинге лесов единицей обследуемой площади является 1га ( $10000 \text{ м}^2$ ), то специалистов лесной отрасли обычно интересует время, затрачиваемое на вычисление моделей при анализе снимка леса площадью 1 га.



а – Снимок тестового участка

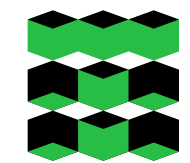
б – Эталонная карта сегментации

в – Результаты модели Segformer+

г – Результаты модели Mo-U-Net

д – Результаты модели At-Mo-U-Net

е – Результаты модели Res-Mo-U-Net



# Выбор модели нейронных сетей

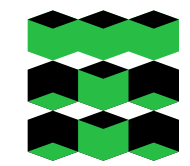
Результаты исследований разработанных моделей по точности классификации в виде значений метрик IoUc и mIoU на тестовой выборке

Модель	IoUc						mIoU
	Фон	Условно здоровое	Свежеза- селенное	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	
Segformer+	0.88	0.77	0.56	0.56	0.65	0.75	0.70
U-Net	0.85	0.72	0.50	0.50	0.58	0.72	0.65
Mo-U-Net	0.87	0.75	0.53	0.55	0.64	0.74	0.68
At-Mo-U-Net	0.87	0.76	0.55	0.55	0.64	0.74	0.69
Res-Mo-U-Net	0.88	0.76	0.56	0.55	0.63	0.75	0.69

Результаты исследований разработанных моделей по скорости вычисления при анализе снимка леса площадью 1 га.

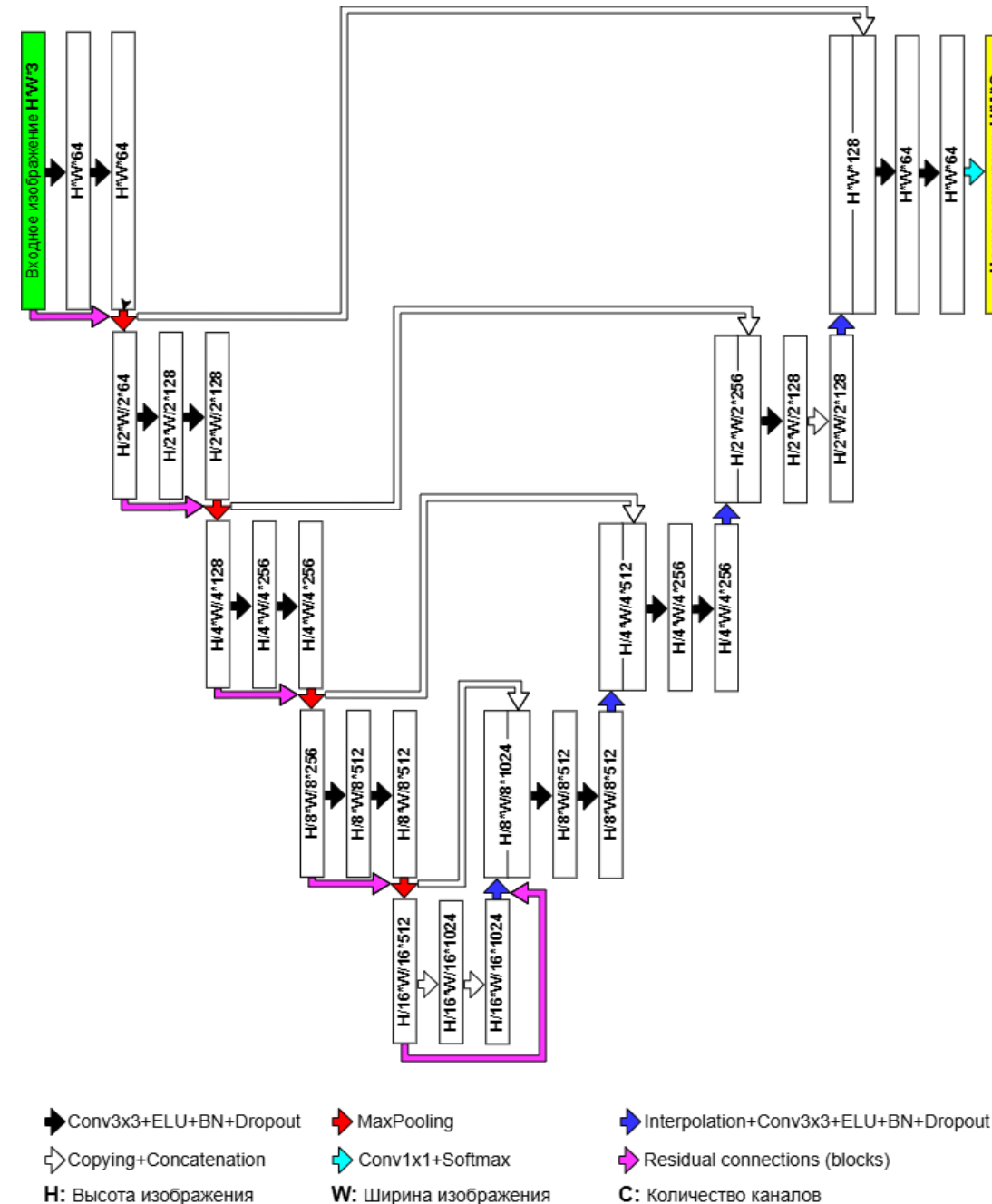
Модель	Время вычисления модели, мс
Segformer+	311.2
U-Net	164.9
Mo-U-Net	166.2
At-Mo-U-Net	253.0
Res-Mo-U-Net	180.5

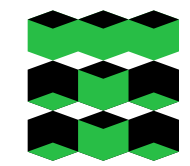
Согласно представленным таблицам, модель **Res-Mo-U-Net** демонстрирует наилучший баланс между точностью классификации и скоростью вычислений.



# Архитектура модели нейронной сети Res-Mo-U-Net

Модель с остаточными блоками для решения проблемы затухания градиентов





# Метод анализа динамики состояния здоровья деревьев кедр

Предложенный метод отличается от известных методов способом построения матрицы переходов состояний здоровья деревьев и позволяет отслеживать динамику состояния здоровья отдельных деревьев за определенный период времени. Реализующий его алгоритм включает следующие этапы:

На вход алгоритма подаются маски семантической сегментации (попиксельной классификации), для двух разных моментов времени полученные с помощью выбранной нейронной сети.

1. Улучшение полученных масок сегментации путем:
  - Удаления мелких объектов, не соответствующих кронам деревьев кедр.
  - Уточнения границ крон деревьев кедр для устранения перекрытий и обеспечения чёткого разделения крон отдельных деревьев.
2. Идентификация крон деревьев кедр на снимках:
  - Определение их класса
  - Поиск центраида (местоположения на снимке)
  - Вычисление площади.
3. Сопоставление крон деревьев кедр идентифицированных на обоих снимках.
4. Анализ переходов состояния здоровья каждого дерева на основе сопоставленных крон деревьев кедр с двух разных снимков.
5. Построение матрицы переходов состояния здоровья деревьев.





# Исходные снимки для анализа

Участок расположен вблизи посёлка  
Белоусово Томской области

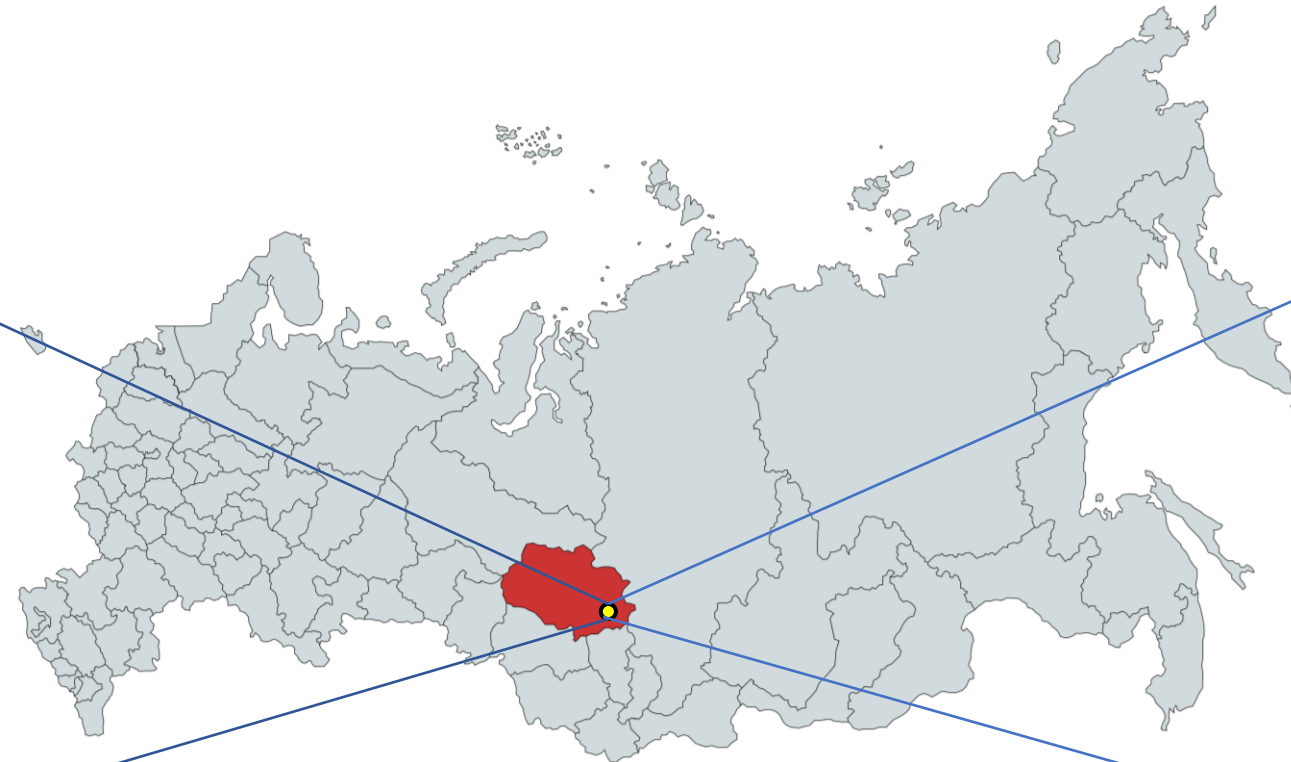
Снимок с БПЛА DJI P4

Пространственное разрешение: 8 см.

Размер: 1250 x 1250 пикселей

Площадь: 1 га.

Год: **2023**



Снимок с БПЛА DJI P4

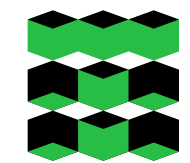
Пространственное разрешение: 8 см.

Размер: 1250 x 1250 пикселей

Площадь: 1 га.

Год: **2025**





# Попиксельная классификация разновременных СНИМКОВ

RGB-снимок с БПЛА (2023 г.)

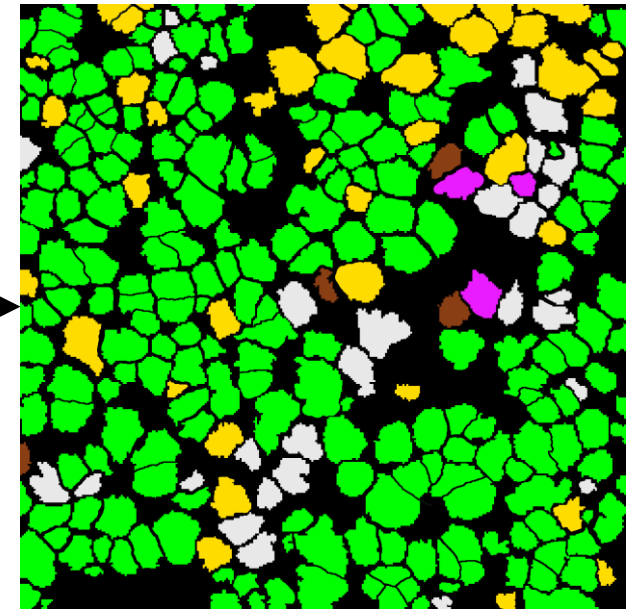


RGB-снимок с БПЛА (2025 г.)

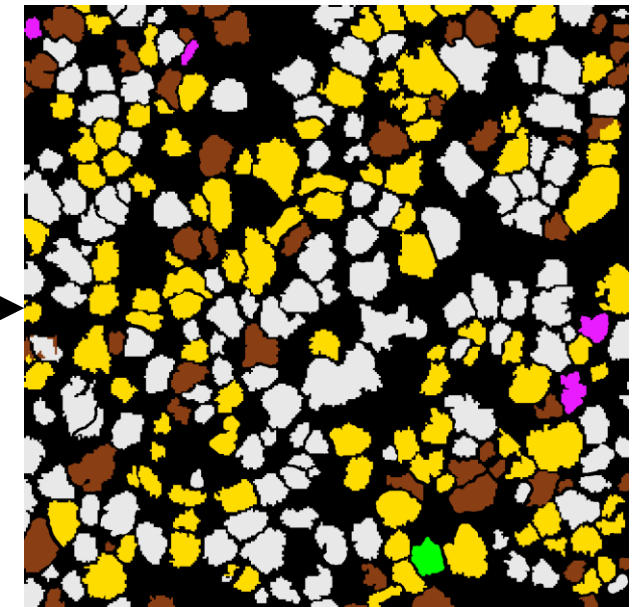






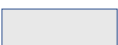
Нейронная сеть  
Res-Mo-U-Net

Маска семантической сегментации (2023 г.)



Маска семантической сегментации (2025 г.)



- |  |                  |   |                    |
|--|------------------|---|--------------------|
|  | Фон              |  | С усохшей вершиной |
|  | Условно здоровое |  | Свежий сухостой    |
|  | Свежезаселенное  |  | Старый сухостой    |

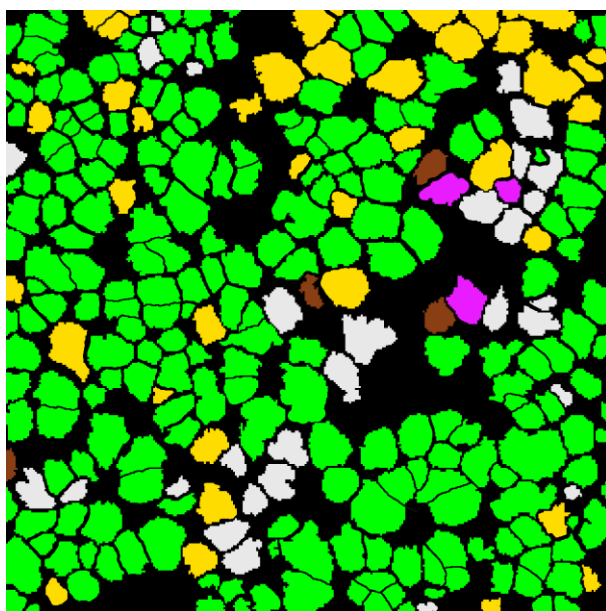




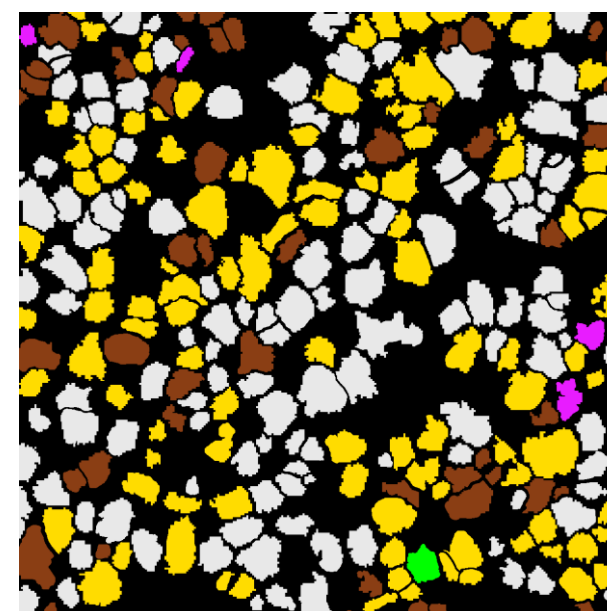
# Улучшение полученных масок сегментации

- **Удаление мелких объектов** из маски сегментации путём фильтрации областей по минимальному размеру для уменьшения шума и исключения незначимых деталей.
- **Уточнение границ объектов (крон деревьев кедра)** с использованием морфологических операций и сглаживания, что обеспечивает чёткое разделение объектов и предотвращает их наложение друг на друга, улучшая качество и точность маски.

Маска сегментации 2023 г.



Маска сегментации 2025 г.

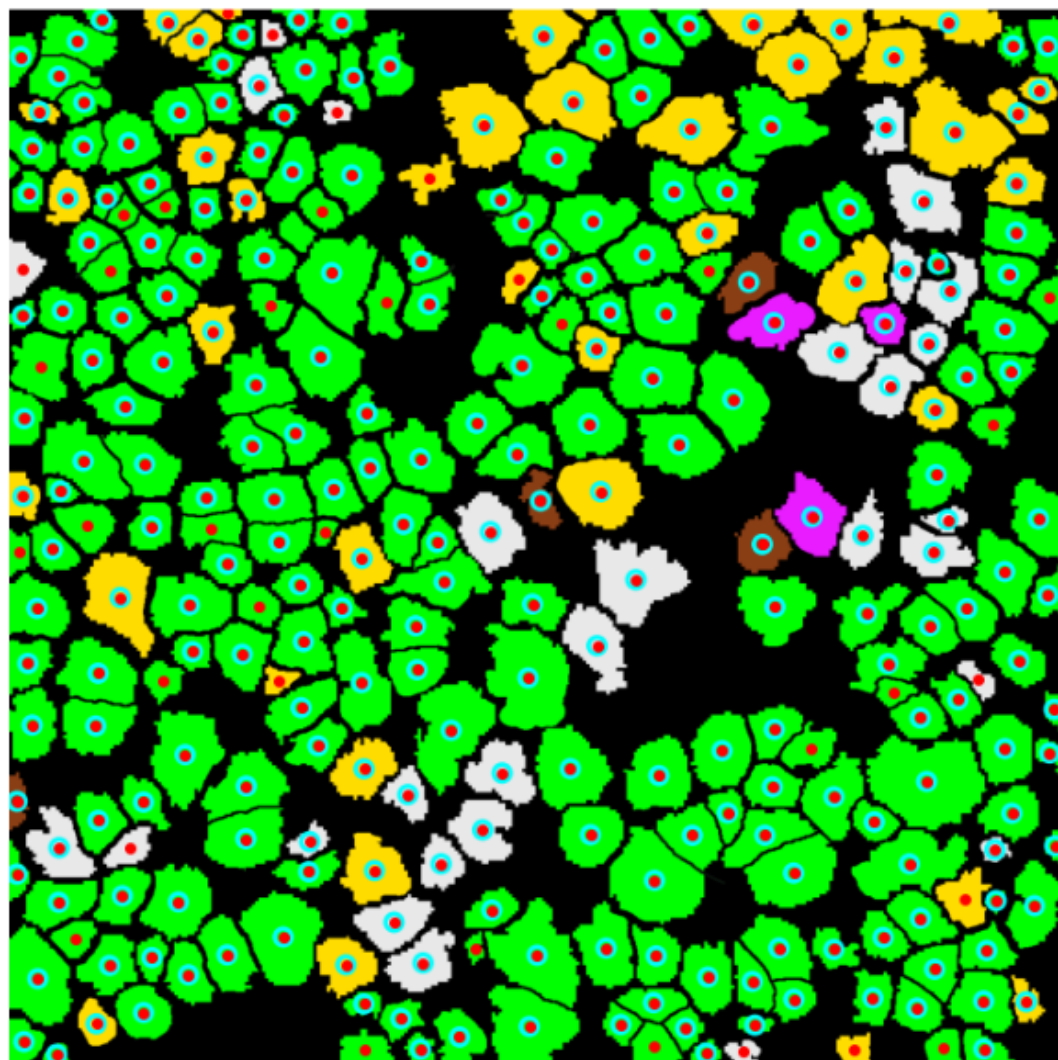




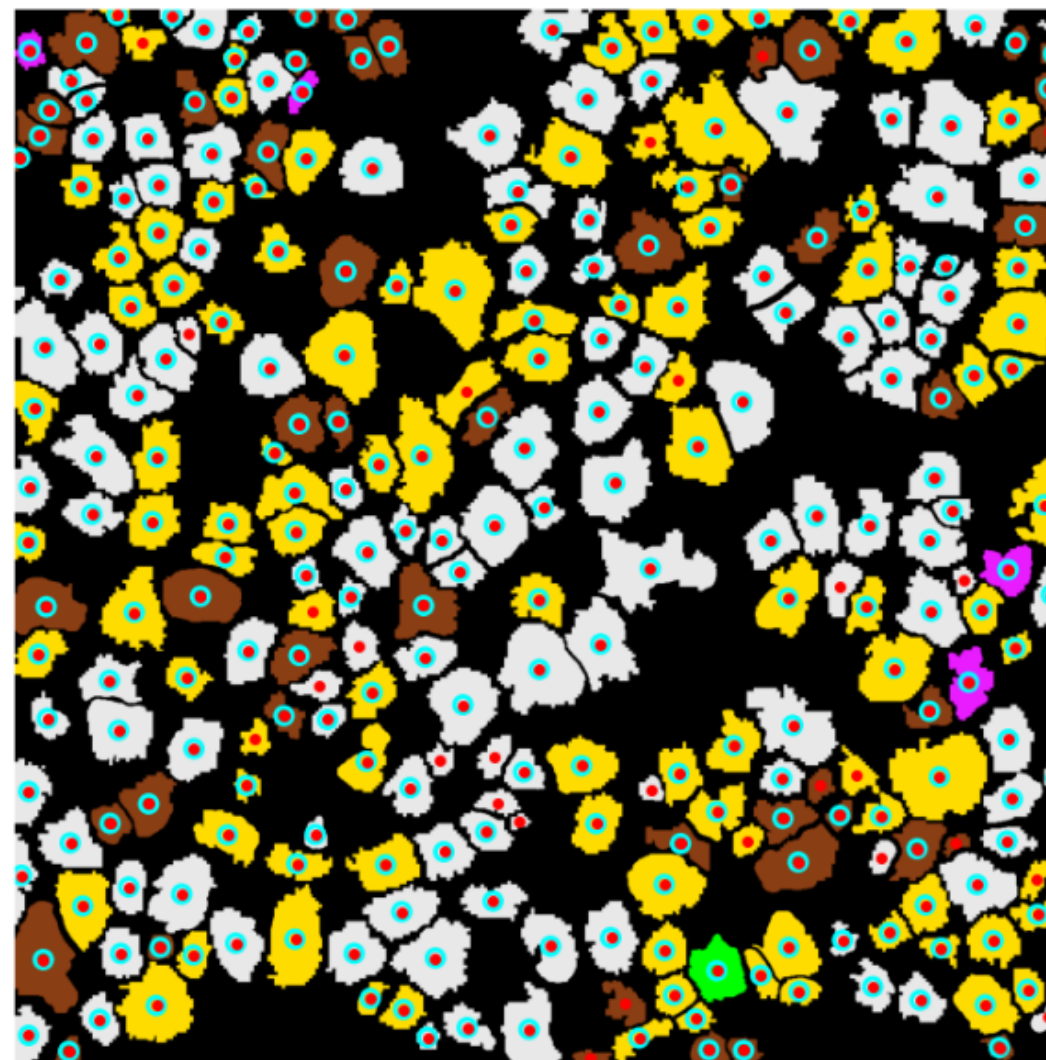


# Идентификация крон деревьев кедра на снимках

Маска семантической сегментации (2023 г.)



Маска семантической сегментации (2025 г.)



Идентификация крон деревьев кедра на снимках с определением:

- Класса дерева
- Центроида
- Площади
- Присвоения уникального идентификатора.

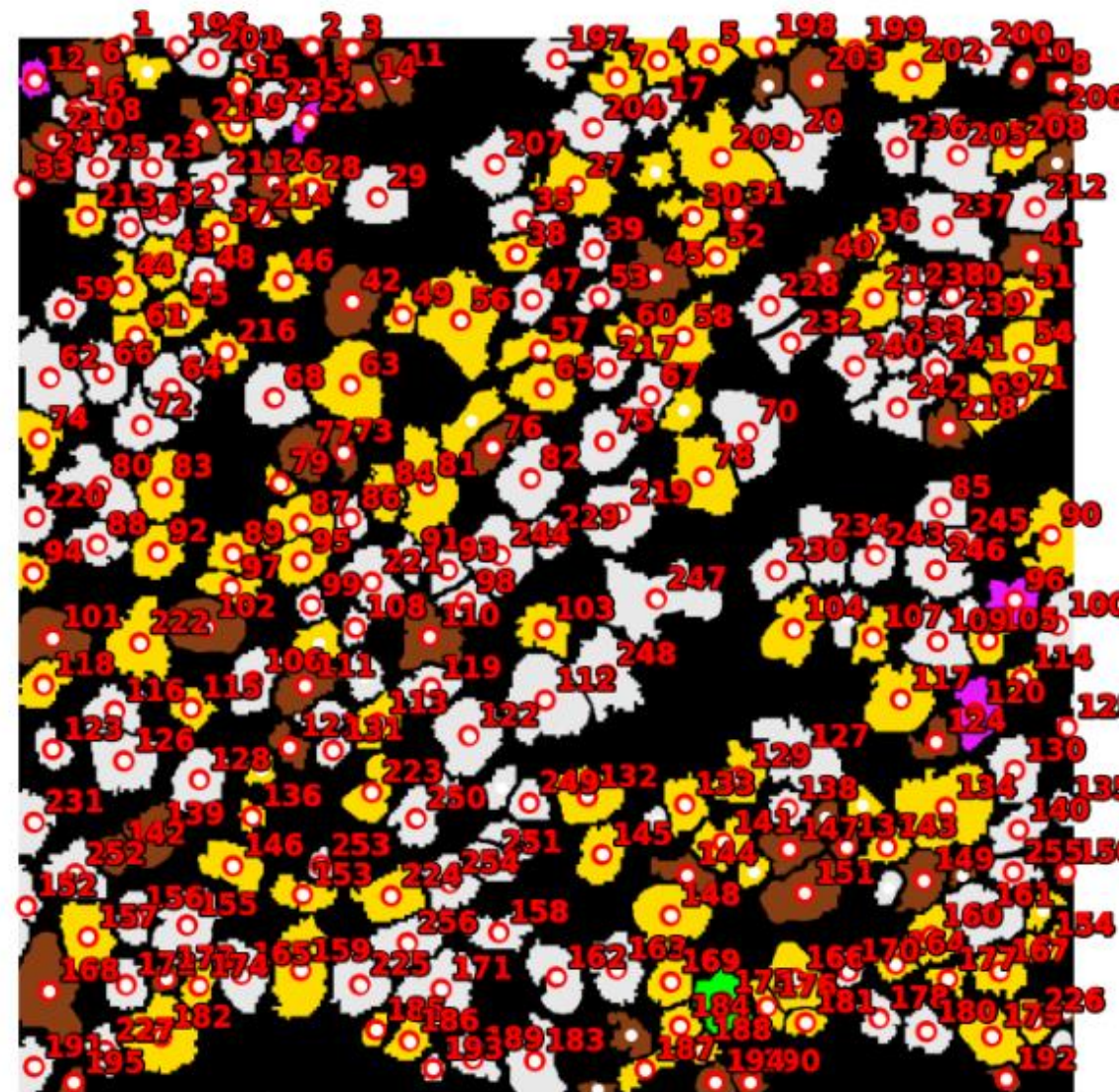
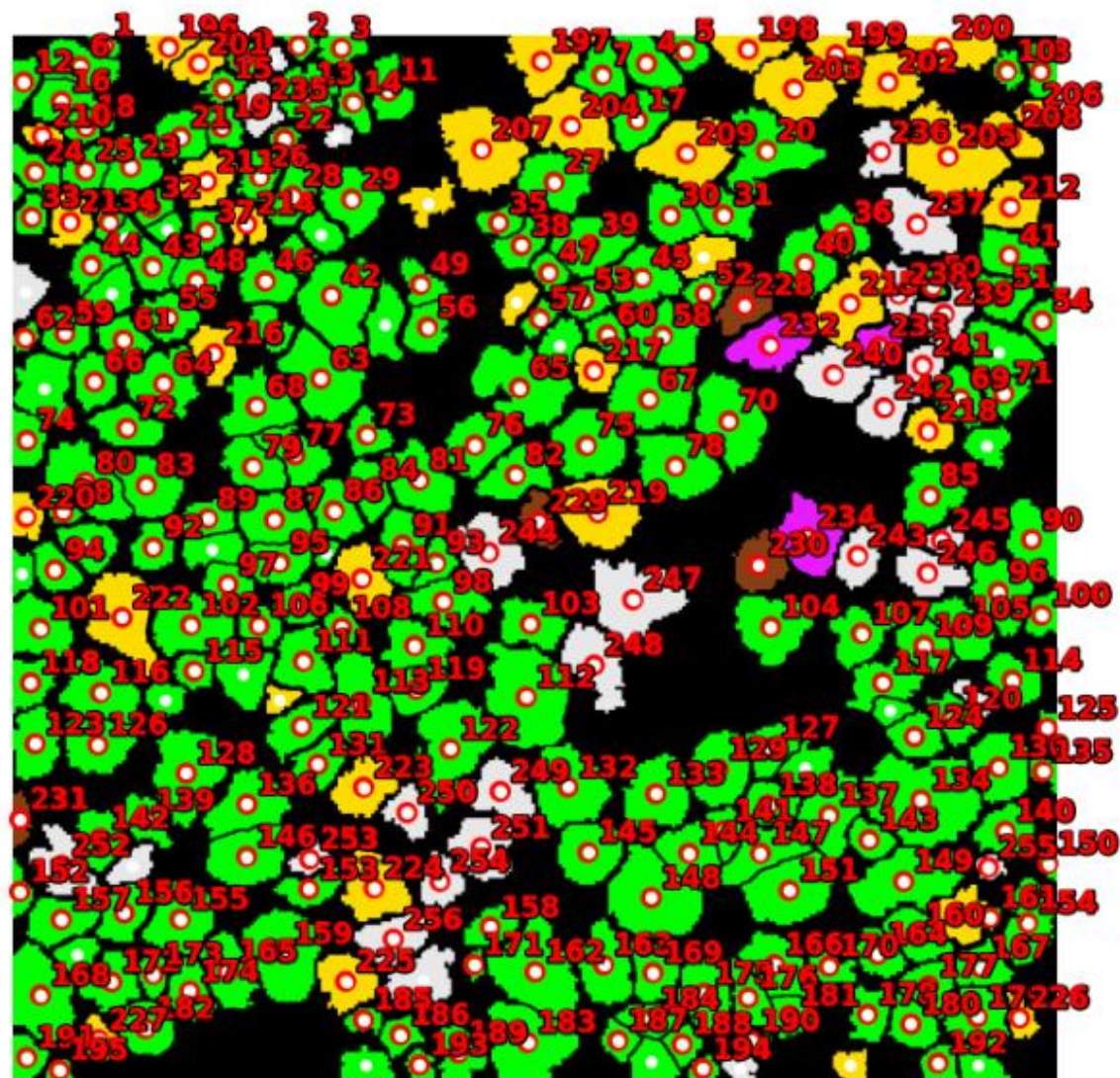
Центроиды используются для сопоставления крон деревьев на обоих снимках.





## Сопоставление крон деревьев кедра идентифицированных на обоих снимках

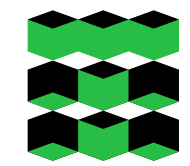
Числовые метки обозначают соответствующие друг другу кроны деревьев на снимках разных лет



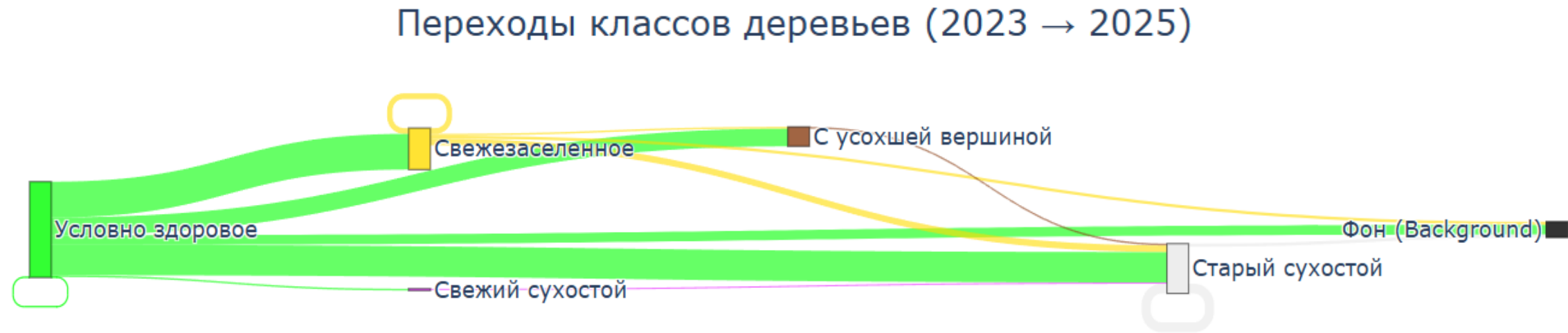
Сопоставление крон деревьев на снимках выполняется с помощью метода К-ближайших соседей (KNN), что обеспечивает более надёжное соответствие, поскольку центры крон не всегда совпадают. Это связано с тем, что GPS-координаты БПЛА, полученные в ходе двух разных полётов, могут различаться на 1–3 метра, а также с изменением формы и площади крон, приводящим к смещению их центров.

Сопоставление крон деревьев на снимках позволяет не только установить их пространственное соответствие, но и отследить динамику состояния здоровья отдельных деревьев во времени.



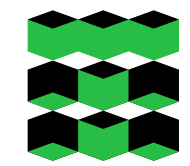


# Анализ динамики состояния здоровья деревьев кедра



- Диаграмма Сэнки наглядно показывает переход деревьев между различными состояниями здоровья в период с 2023 по 2025 год, отражая динамику изменений их состояния здоровья деревьев кедра.
- Каждый вертикальный блок-узел на диаграмме соответствует определённому классу состояния деревьев в 2023 году (слева) или в 2025 году (справа), отражая переход состояний между этими годами.
- Цветные переходы (ленты) между узлами отображают количество деревьев, которые перешли из одного класса состояния в 2023 году в другой класс в 2025 году, отражая динамику переходов между этими состояниями.
- Переходы к узлу «Фон» отражают деревья, которые исчезли к 2025 году.





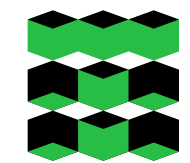
# Матрица переходов состояния здоровья по изменениям количества деревьев в классах



Анализ динамики состояния здоровья по изменениям количества деревьев в классах – 2023 и 2025 гг.

Текущее состояние Предыдущее состояние	Условно здоровое	Свежеза- селенное	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	Фон	Итого в 2023
Условно здоровое	1	81	40	4	69	22	217
Свежезаселенное	0	13	4	0	15	7	39
С усохшей вершиной	0	0	0	0	4	0	4
Свежий сухостой	0	0	0	0	3	0	3
Старый сухостой	0	0	0	0	22	7	29
Вновь появившееся (Фон)	0	9	7	0	13	0	-
Итого в 2025	1	103	51	4	126	-	285 292

- Матрица переходов показывает динамику состояния здоровья отдельных деревьев между 2023 и 2025 годами. В ней:
  - Строки «Предыдущее состояние» представляют классы в 2023 году (исходные состояния).
  - Столбцы «Текущее состояние» представляют классы в 2025 году (конечные состояния).
  - Значения в ячейках показывают количество деревьев, перешедших из определённого класса 2023 года в соответствующий класс 2025 года.
- Диагональные значения показывают, сколько деревьев сохранили своё состояние.
- Пример: в строке «Условно здоровое»: 1 дерево осталось в состоянии «Условно здоровое»; 81 дерево перешло в «Свежезаселённое»; 40 — в «С усохшей вершиной»; 4 — в «Свежий сухостой»; 69 — в «Старый сухостой»; 22 дерева перешли в «Фон», то есть исчезли.
- Строка «Вновь появившиеся (Фон)» обозначает деревья, зафиксированные в 2025 года, которые отсутствовали в 2023 году. Иными словами, участки, идентифицированные как фон в 2023 году, в 2025 году классифицированы как занятые деревьями.
- Матрица позволяет проанализировать динамику состояния здоровья леса, выявив количество ухудшившихся, исчезнувших и вновь появившихся деревьев.



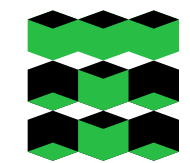
# Матрица переходов состояния здоровья деревьев путем оценки площади крон деревьев по классам



Анализ динамики состояния здоровья деревьев путем оценки площади крон деревьев по классам (м<sup>2</sup>) – 2023 и 2025 гг.

Текущее состояние Предыдущее состояние	Условно здоровое	Свежеза- селенное	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	Фон	Итого в 2023
Условно здоровое	20.10	1191.49	476.70	36.15	974.63	1635.02	4333.57
Свежезаселенное	0	213.31	47.43	0	305	255.43	821.56
С усохшей вершиной	0	0	0	0	45.52	14.44	59.96
Свежий сухостой	0	0	0	0	48.71	22.64	71.35
Старый сухостой	0	1.96	5.89	4.81	362.37	156.15	531.18
Фон	3.59	392.29	142.08	9.29	488.63	3146.50	4182.38
Итого в 2025	23.69	1799,05	672.11	50.25	2224.72	5230.18	10000

- Матрица переходов состояния здоровья деревьев при оценки изменения площади крон деревьев показывает, как изменилась площадь крон деревьев по классам между 2023 и 2025 годами. В ней:
  - Строки «Предыдущее состояние» представляют классы в 2023 году (исходные состояния).
  - Столбцы «Текущее состояние» представляют классы в 2025 году (конечные состояния).
  - Значения в ячейках отражают площадь в квадратных метрах, которая перешла из класса 2023 года в класс 2025 года.
- Значения по диагонали показывают площадь, занятую деревьями, оставшимися в том же состоянии. Нулевые значения означают, что ни одно дерево не сохранило своё состояние здоровья.
- Вне диагонали расположены площади, где произошли изменения классов.
- Пример: из класса «Условно здоровое»; 20.1 м<sup>2</sup> осталось в том же классе, 1191.49 м<sup>2</sup> перешло в класс «Свежезаселённое»; 476.70 м<sup>2</sup> — в класс «С усохшей вершиной»; 36.15 м<sup>2</sup> — в класс «Свежий сухостой»; 974.63 м<sup>2</sup> — в класс «Старый сухостой»; и 1635.02 м<sup>2</sup> — перешло в «Фон», то есть исчезло.
- Матрица позволяет понять, где и как происходят изменения в лесном покрове, выделяя стабильные и изменяющиеся участки.



# Результаты анализа динамики состояния здоровья деревьев, полученные традиционными методами

Традиционный анализ состояния деревьев путем изменения количества деревьев по классам

Состояние здоровья	Кол. деревьев в 2023 г.	Кол. деревьев в 2025 г.	Изменение кол. деревьев
Условно здоровое	217	1	-216
Свежеселенное	39	103	+64
С усохшей вершиной	4	51	+47
Свежий сухостой	3	4	+1
Старый сухостой	29	126	+97
Итого	292	285	-7

Традиционный анализ состояния деревьев путем изменения площади (количества пикселей) по классам

Состояние здоровья	Площадь в 2023 г. (м <sup>2</sup> )	Площадь в 2025 г. (м <sup>2</sup> )	Изменение площади (%)
Условно здоровое	4333.57	23.69	- 99.5
Свежеселенное	821.56	1799.05	+ 120.3
С усохшей вершиной	59.96	672.11	+ 979.7
Свежий сухостой	71.35	50.25	- 29.6
Старый сухостой	531.18	2224.72	+ 329.2
Фон	4182.38	5230.18	+ 24.1
Итого	10000	10000	0.0

**Традиционные методы** позволяют оценить **общие количественные изменения** числа деревьев или **площади по классам**, однако **не отражают переходы** между состояниями и внутреннюю динамику кедровых лесов.

**Сравнительный анализ** двух традиционных методов и метода матрицы переходов (слайды 15, 16) **позволяет утверждать**, что последний обеспечивает более детальную характеристику динамики состояния здоровья деревьев. Предложенный метод позволяет отследить не только общие тренды, но и конкретные переходы: **сколько деревьев сохраняют своё состояние, переходят в другие классы**, а также случаи отпада (**исчезновения**) или **появления новых деревьев кедра**. Благодаря такой детализации становятся доступными для идентификации процессы деградации и восстановления кедровых лесов, которые остаются скрытыми при использовании традиционных методов.

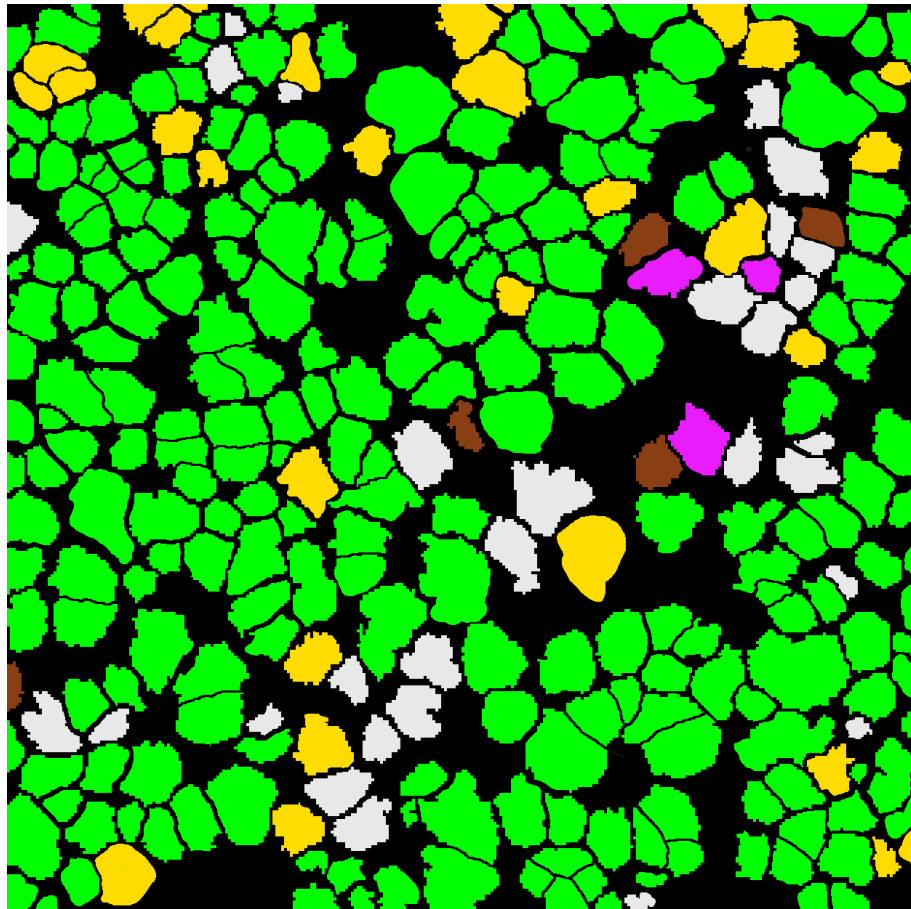
Таким образом, метод матрицы переходов обеспечивает более полное и информативное описание пространственно-временной динамики **состояния здоровья** кедровых лесов и может служить надёжной основой для принятия управленческих решений в области мониторинга и охраны лесных экосистем.



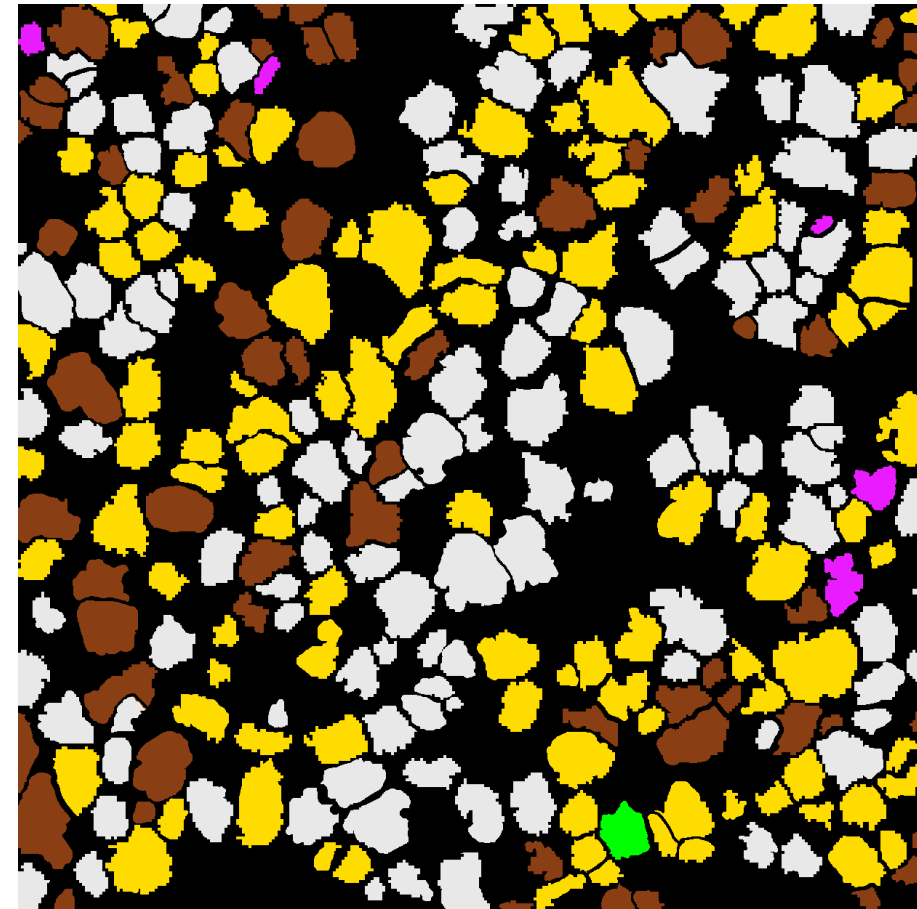
## Экспертная разметка разновременных снимков

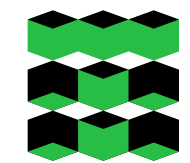
Для более полного анализа проведён анализ динамики состояния здоровья деревьев с использованием масок, полученных экспертами **ИМКЭС СО РАН**.

Маска семантической сегментации, созданная экспертами (2023 г.)



Маска семантической сегментации, созданная экспертами (2025 г.)





## Сравнение результатов предложенного метода, полученных с помощью нейронной сети и полученных экспертами (по количеству деревьев)



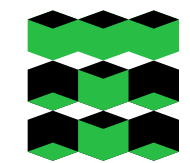
Результаты анализа динамики состояния здоровья по изменениям количества деревьев в классах, полученные с помощью нейронной сети (2023 и 2025 гг.)

Текущее состояние Предыдущее состояние	Условно здоровое	Свежеза- селенное	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	Фон	Итого в 2023
Условно здоровое	1	81	40	4	69	22	217
Свежезаселенное	0	13	4	0	15	7	39
С усохшей вершиной	0	0	0	0	4	0	4
Свежий сухостой	0	0	0	0	3	0	3
Старый сухостой	0	0	0	0	22	7	29
Вновь появившееся (Фон)	0	9	7	0	13	0	-
Итого в 2025	1	103	51	4	126	-	285 292

Результаты анализа динамики состояния здоровья по изменениям количества деревьев в классах, полученные экспертами (2023 и 2025 гг.)

Текущее состояние Предыдущее состояние	Условно здоровое	Свежеза- селенное	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	Фон	Итого в 2023
Условно здоровое	1	86	50	4	60	26	227
Свежезаселенное	0	8	4	0	11	6	29
С усохшей вершиной	0	0	0	1	4	0	5
Свежий сухостой	0	0	0	0	3	0	3
Старый сухостой	0	0	0	0	23	6	29
Вновь появившееся (Фон)	0	12	8	0	11	0	-
Итого в 2025	1	106	62	5	112	-	286 293

При сравнении результатов, полученных с применением нейронной сети и полученных экспертами, выявлено высокое сходство между обоими источниками данных. Расхождения по большинству переходов не превышают 10–15%, что свидетельствует о надёжности и эффективности нейронной сети.



Результаты анализа динамики состояния здоровья деревьев путем оценки площади крон деревьев по классам (м<sup>2</sup>), полученные с помощью нейронной сети (2023 и 2025 гг.)

Текущее состояние Предыдущее состояние	Условно здоровое	Свежеза- селенное	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	Фон	Итого в 2023
Условно здоровое	20.10	1191.49	476.70	36.15	974.63	1635.02	4333.57
Свежезаселенное	0	213.31	47.43	0	305	255.43	821.56
С усохшей вершиной	0	0	0	0	45.52	14.44	59.96
Свежий сухостой	0	0	0	0	48.71	22.64	71.35
Старый сухостой	0	1.96	5.89	4.81	362.37	156.15	531.18
Фон	3.59	392.29	142.08	9.29	488.63	3146.50	4182.38
Итого в 2025	23.69	1799,05	672.11	50.25	2224.72	5230.18	10000

Результаты анализа динамики состояния здоровья деревьев путем оценки площади крон деревьев по классам (м<sup>2</sup>), полученные экспертами (2023 и 2025 гг.)

Текущее состояние Предыдущее состояние	Условно здоровое	Свежеза- селенное	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	Фон	Итого в 2023
Условно здоровое	20.10	1300.90	664.70	36.09	963.49	1787.92	4773.20
Свежезаселенное	0	132.46	34.34	0	178.18	231.23	576.40
С усохшей вершиной	0	0	0	3.08	49.91	22.71	75.70
Свежий сухостой	0	0	0	0	47.91	23.44	71.35
Старый сухостой	0	1.96	6.85	4.81	350.80	157.94	522.36
Фон	3.59	377.41	207.79	9.17	393.75	2989.27	3980.99
Итого в 2025	23.69	1812.73	913.68	53.34	1984.04	5212.51	10000

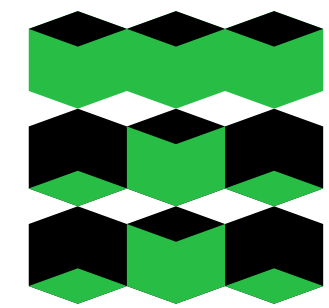
При сравнении результатов, полученных с применением нейронной сети и полученных экспертами, выявлено высокое сходство между обоими источниками данных. Расхождения по большинству переходов не превышают 10–15%, что свидетельствует о надёжности и эффективности нейронной сети.





## Заключения

- Разработан и исследован метод анализа динамики состояния здоровья (жизненного состояния) деревьев кедр в очагах размножения союзного короеда. Входными данными являются результаты семантической сегментации (попиксельной классификации) разновременных снимков высокого и сверхвысокого разрешения, полученных при мониторинге кедровых лесов с помощью БПЛА. Показано, что предложенный подход, в отличие от существующих методов, учитывающих лишь изменение площади крон деревьев по классам или изменение количества деревьев в классах, позволяет отслеживать динамику состояния здоровья на уровне отдельных деревьев. Такой метод позволяет выявлять переходы между различными состояниями здоровья во времени и тем самым способствует более глубинному пониманию процессов деградации хвойных лесов.
- Общее количество деревьев кедр снизилось с 292 в 2023 году до 285 в 2025 году. Многие деревья, изначально относящиеся к состоянию «Условно здоровое», перешли в более ухудшенные состояния, такие как «Свежезаселенное», «С усохшей вершиной» и «Старый сухостой», что указывает на ухудшение здоровья деревьев в наблюдаемом лесном массиве. При этом часть деревьев исчезла (перешла в «Фон»), что свидетельствует о гибели деревьев.
- Использование матрицы переходов в сочетании с подсчетом отдельных деревьев обеспечивает более точную и информативную оценку состояния здоровья деревьев кедр. Использование результатов предложенного метода позволяет принимать обоснованные меры по мониторингу, управлению и сохранению лесных экосистем на основе выявленных закономерностей и конкретных переходов между состояниями здоровья.



**TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY**



# Анализ динамики состояния здоровья хвойных деревьев по результатам дистанционного лесопатологического мониторинга

**И.А. Керчев: ведущий научный сотрудник, ИМКЭС СО РАН, к.б.н**

**К. Р. Мачука: аспирант ОИТ ТПУ**

**Н. Г. Марков: профессор ОИТ ТПУ, д.т.н**

XXIII Международная конференция

"Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса"

**12 ноября 2025**