

TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY



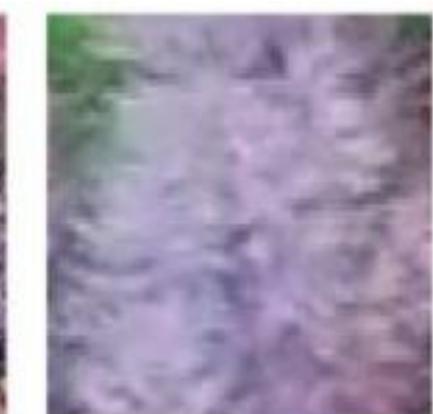
Анализ динамики состояния здоровья хвойных деревьев по результатам дистанционного лесопатологического мониторинга

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"

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

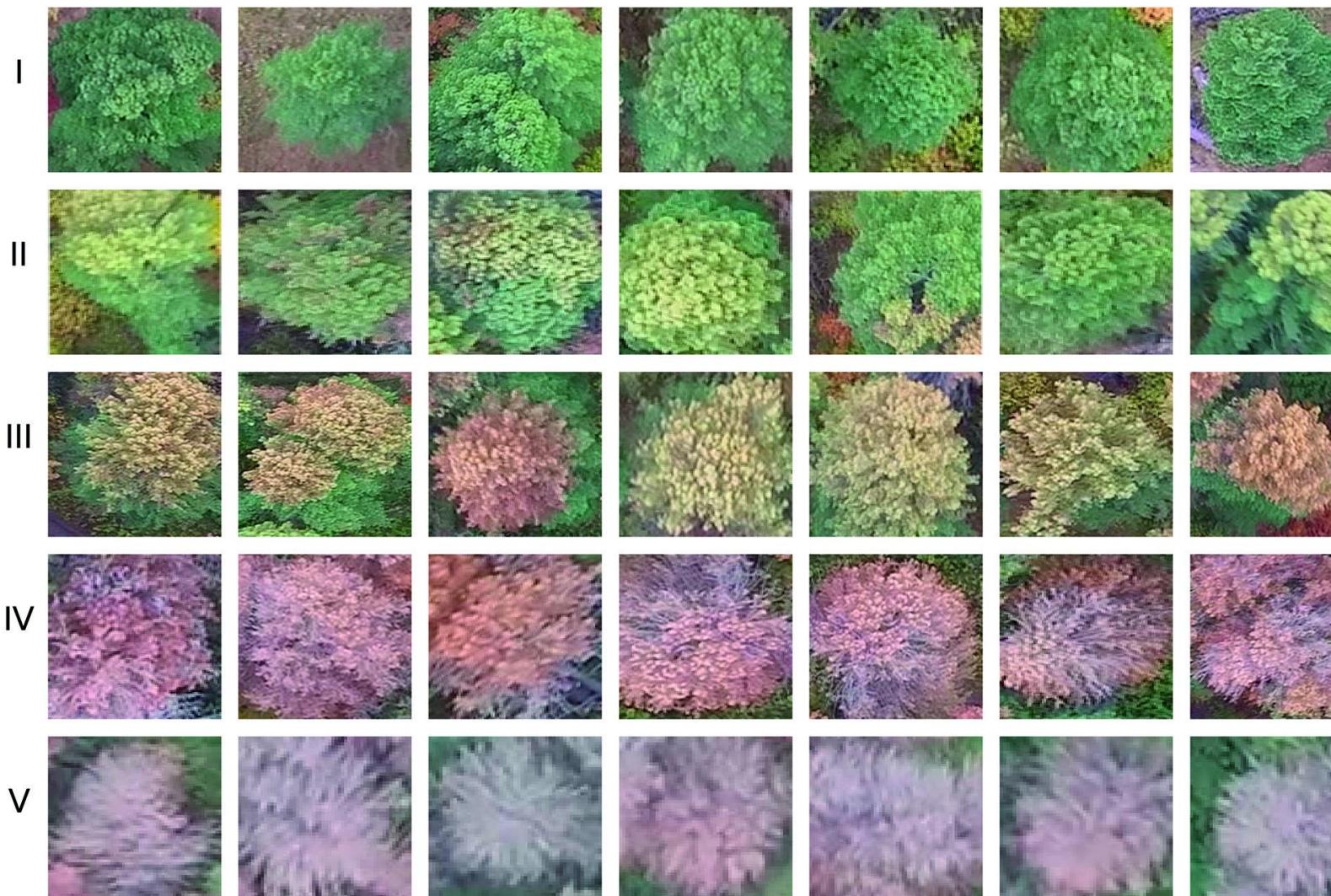
Разработка и исследование нового метода анализа динамики состояния здоровья (жизненного состояния) деревьев кедра *Pinus sibirica* в очагах размножения союзного короеда. Входными данными для этого метода являются результаты семантической сегментации (попиксельной классификации) разновременных снимков 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**:

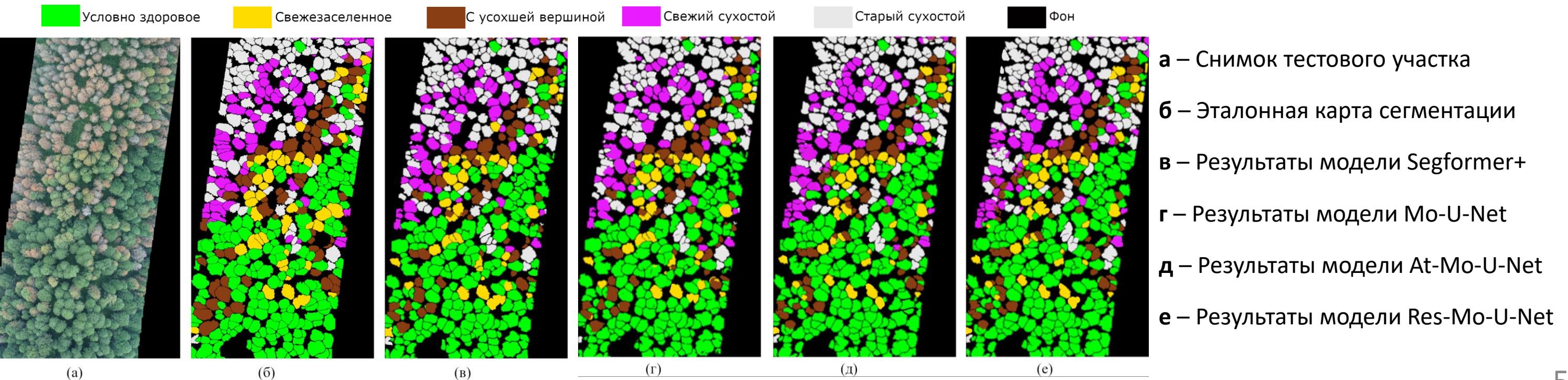
- I – Условно здоровое
- II – Свежезаселенное
- III – С усохшей вершиной
- IV – Свежий сухостой
- V – Старый сухостой

Выбор модели нейронных сетей

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 м^2), то специалистов лесной отрасли обычно интересует время, затрачиваемое на вычисление моделей при анализе снимка леса площадью 1 га.



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	Свежезаселенное	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

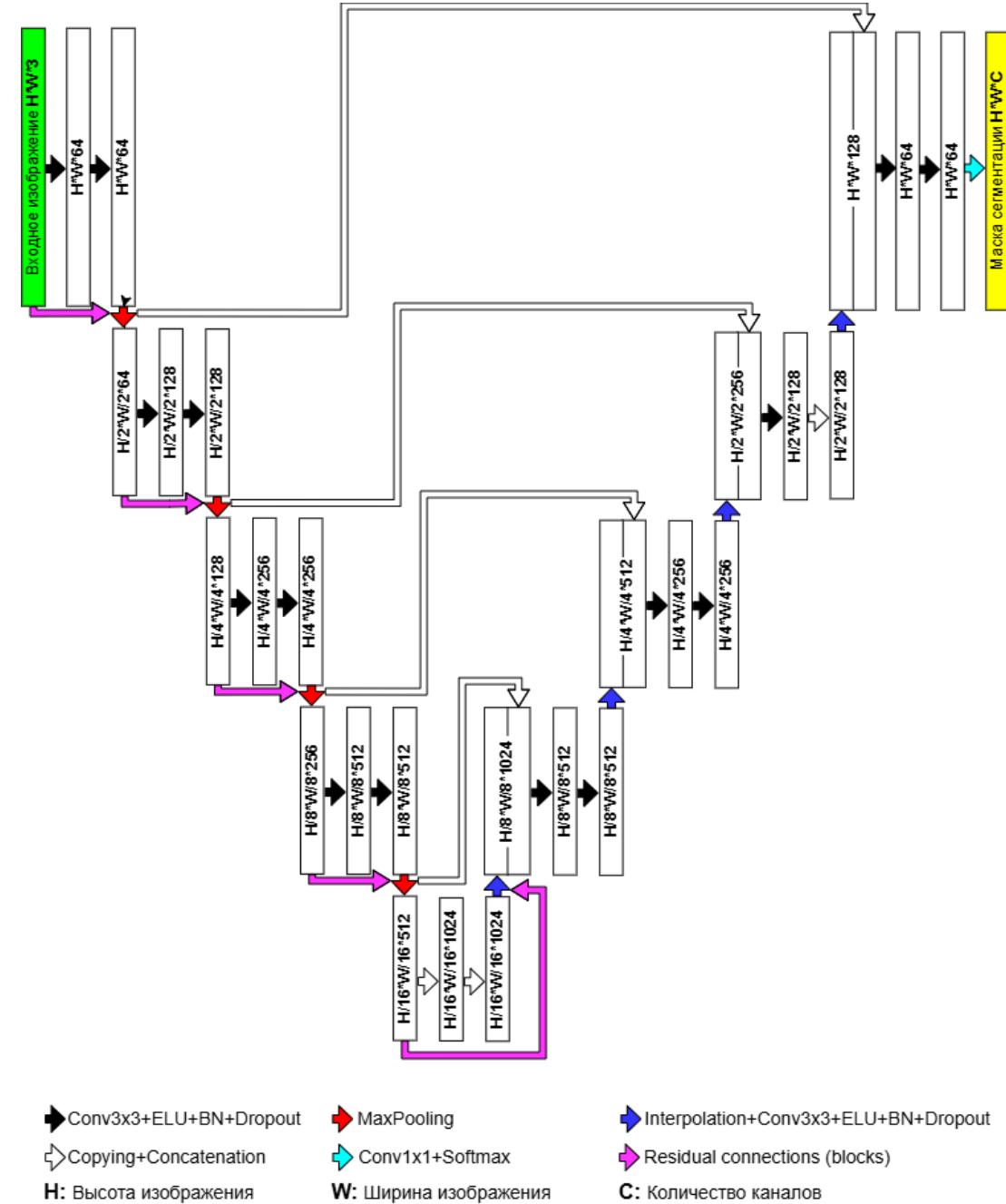
Результаты исследований разработанных моделей по скорости вычисления при анализе снимка леса площадью 1 га.

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 кедра

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 кедра.
 - Уточнения границ крон деревьев кедра для устранения перекрытий и обеспечения чёткого разделения крон отдельных деревьев.
2. Идентификация крон деревьев кедра на снимках:
 - Определение их класса
 - Поиск центроида (местоположения на снимке)
 - Вычисление площади.
3. Сопоставление крон деревьев кедра идентифицированных на обоих снимках.
4. Анализ переходов состояния здоровья каждого дерева на основе сопоставленных крон деревьев кедра с двух разных снимков.
5. Построение матрицы переходов состояния здоровья деревьев.

Исходные снимки для анализа

Снимок с БПЛА DJI P4

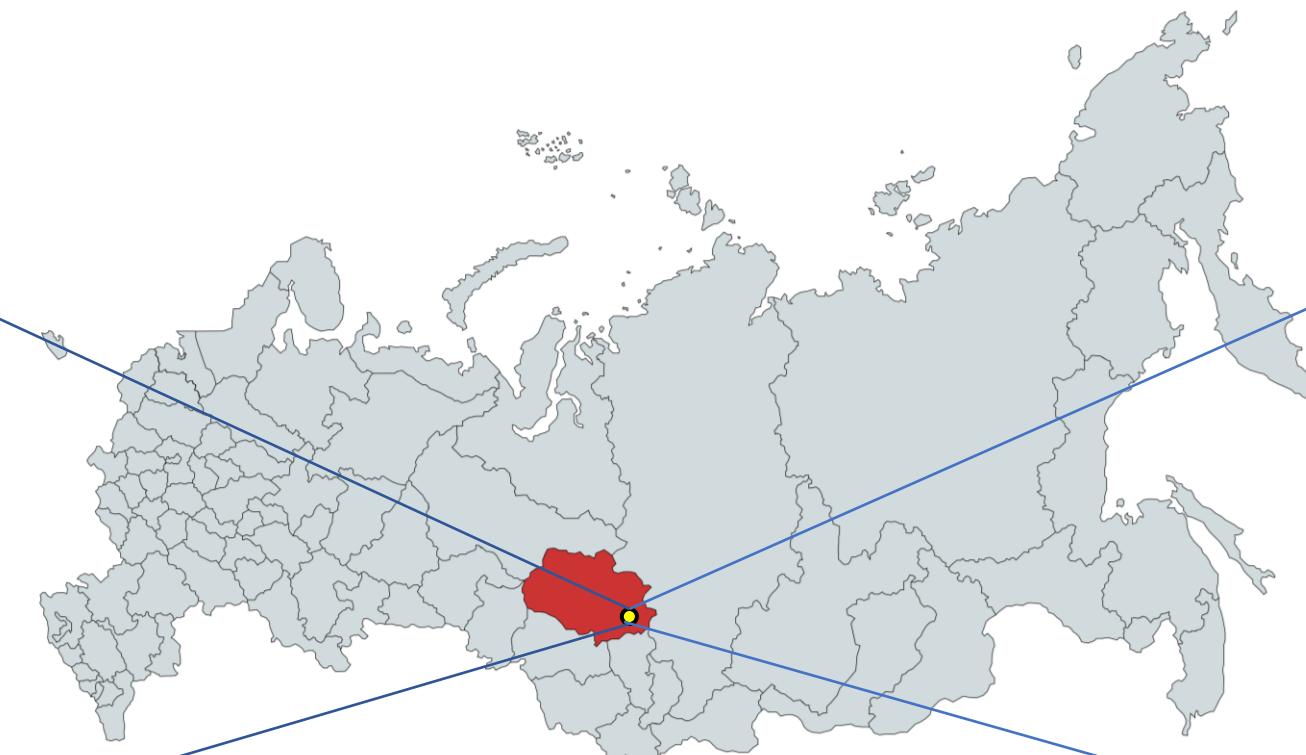
Пространственное разрешение: 8 см.

Размер: 1250 x 1250 пикселей

Площадь: 1 га.

Год: **2023**

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: **2025**



Попиксельная классификация разновременных снимков

RGB-снимок с БПЛА (2023 г.)

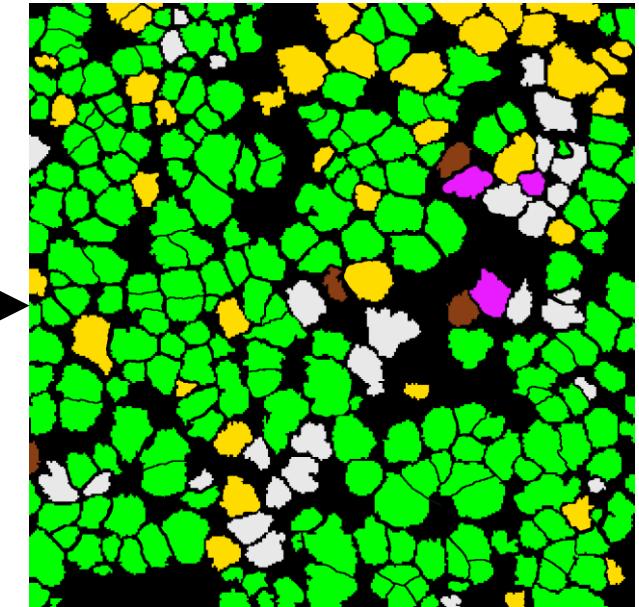


RGB-снимок с БПЛА (2025 г.)

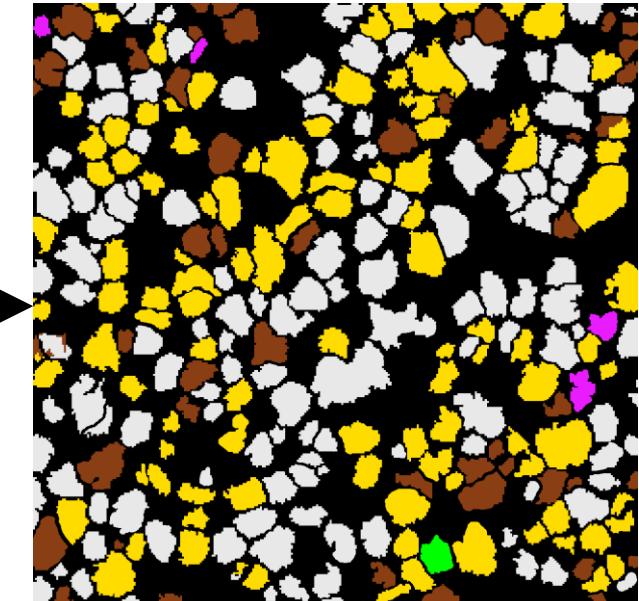


Нейронная сеть
Res-Mo-U-Net

Маска semanticной сегментации (2023 г.)



Маска semanticной сегментации (2025 г.)



Фон

Условно здоровое

Свежезаселенное

С усохшей вершиной

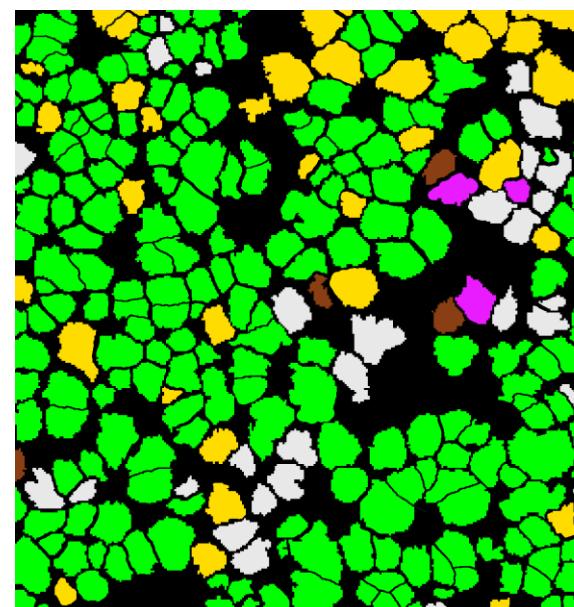
Свежий сухостой

Старый сухостой

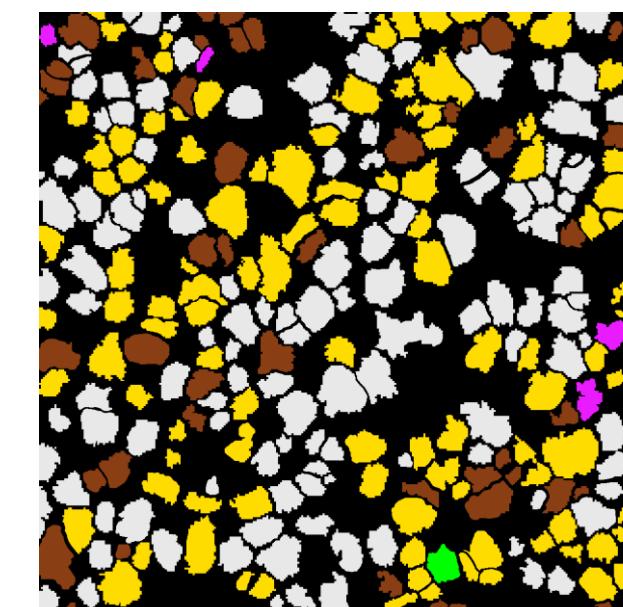
Улучшение полученных масок сегментации

- **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.

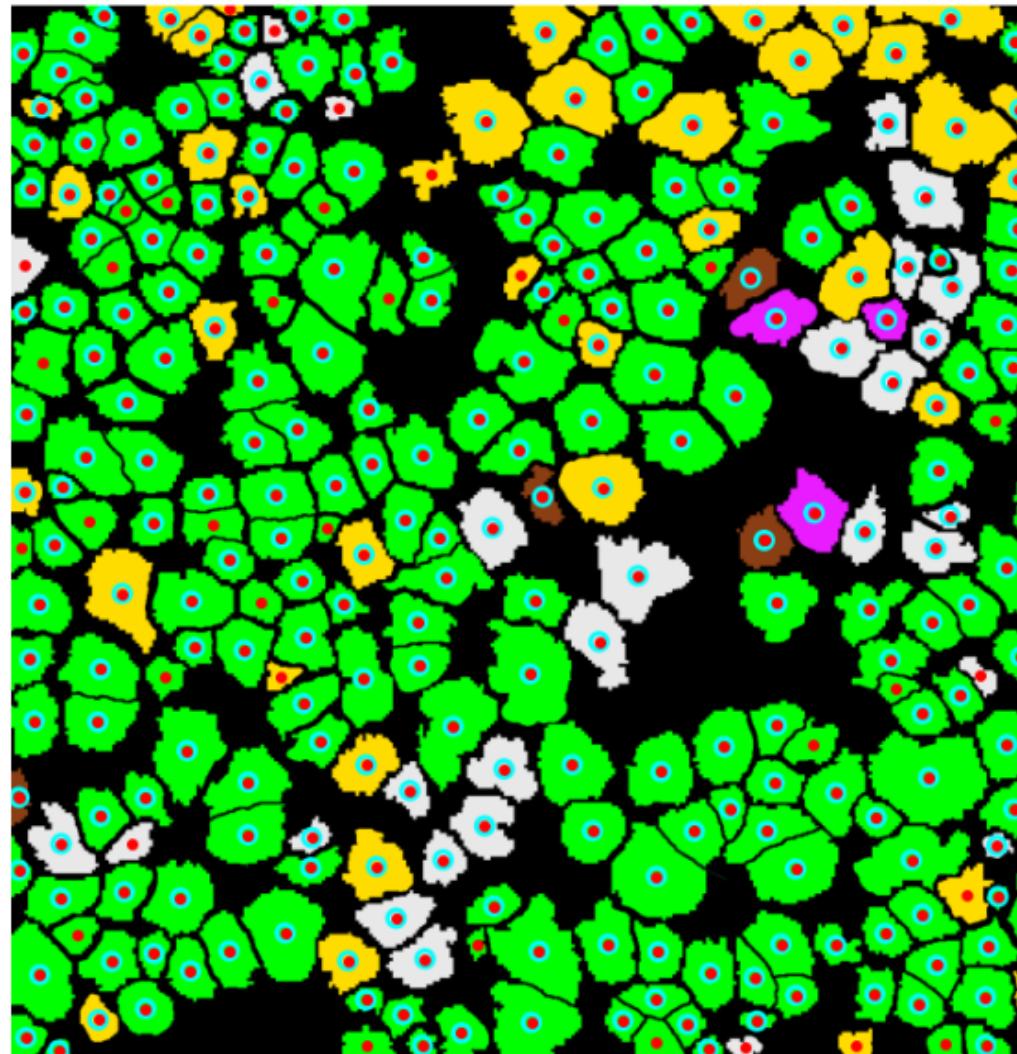


Маска сегментации 2025 г.

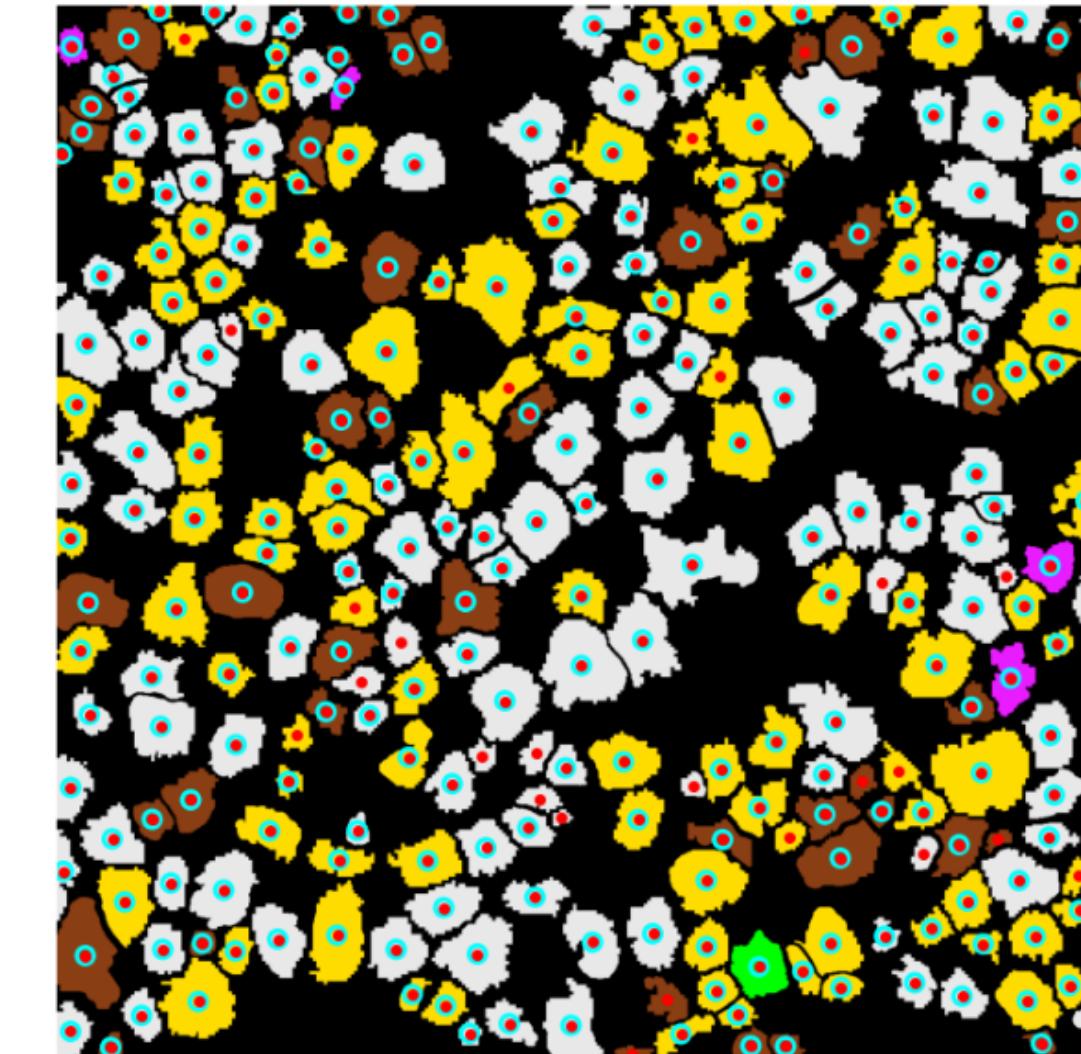


Идентификация крон деревьев кедра на снимках

Маска семантической сегментации (2023 г.)



Маска семантической сегментации (2025 г.)



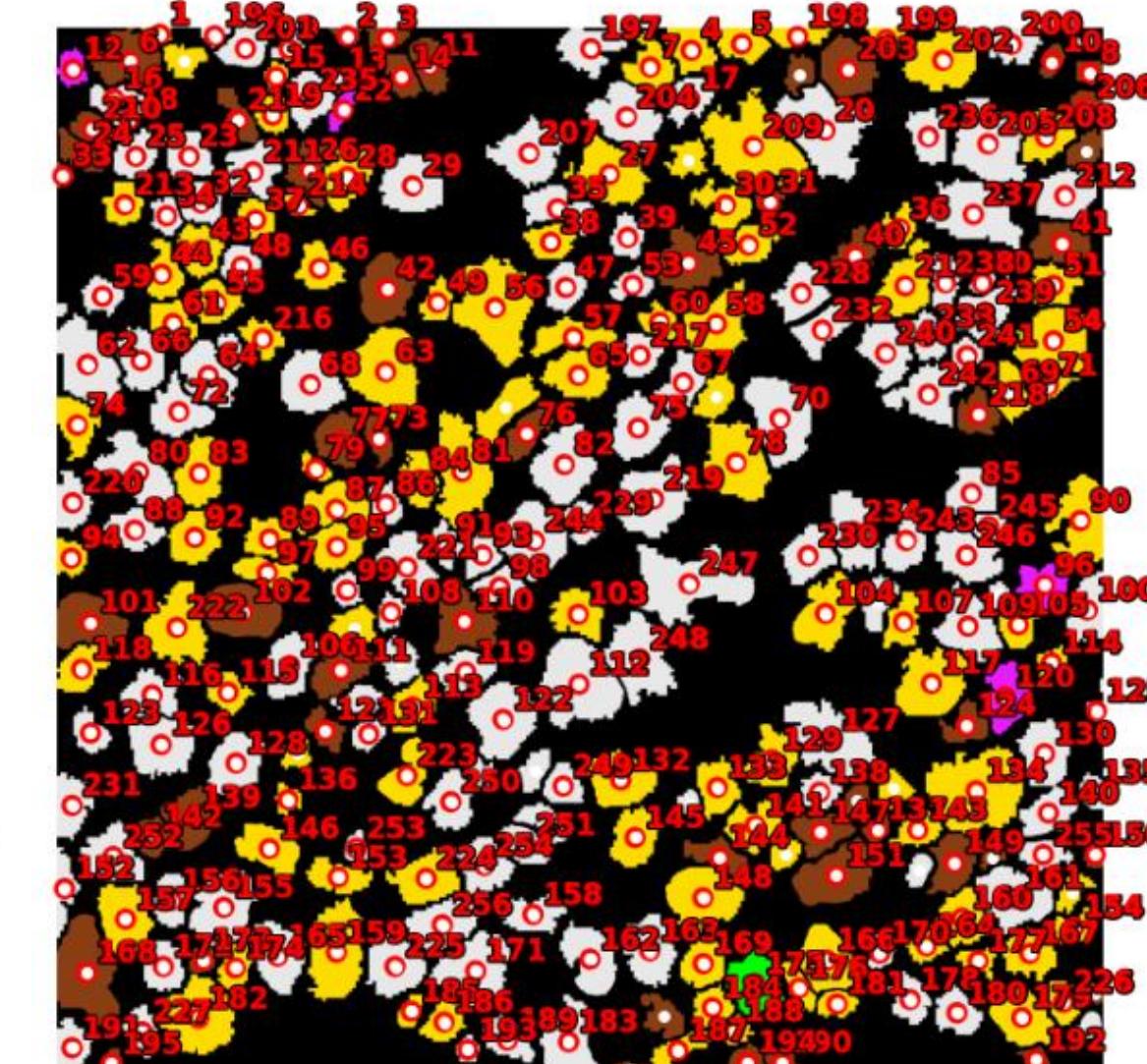
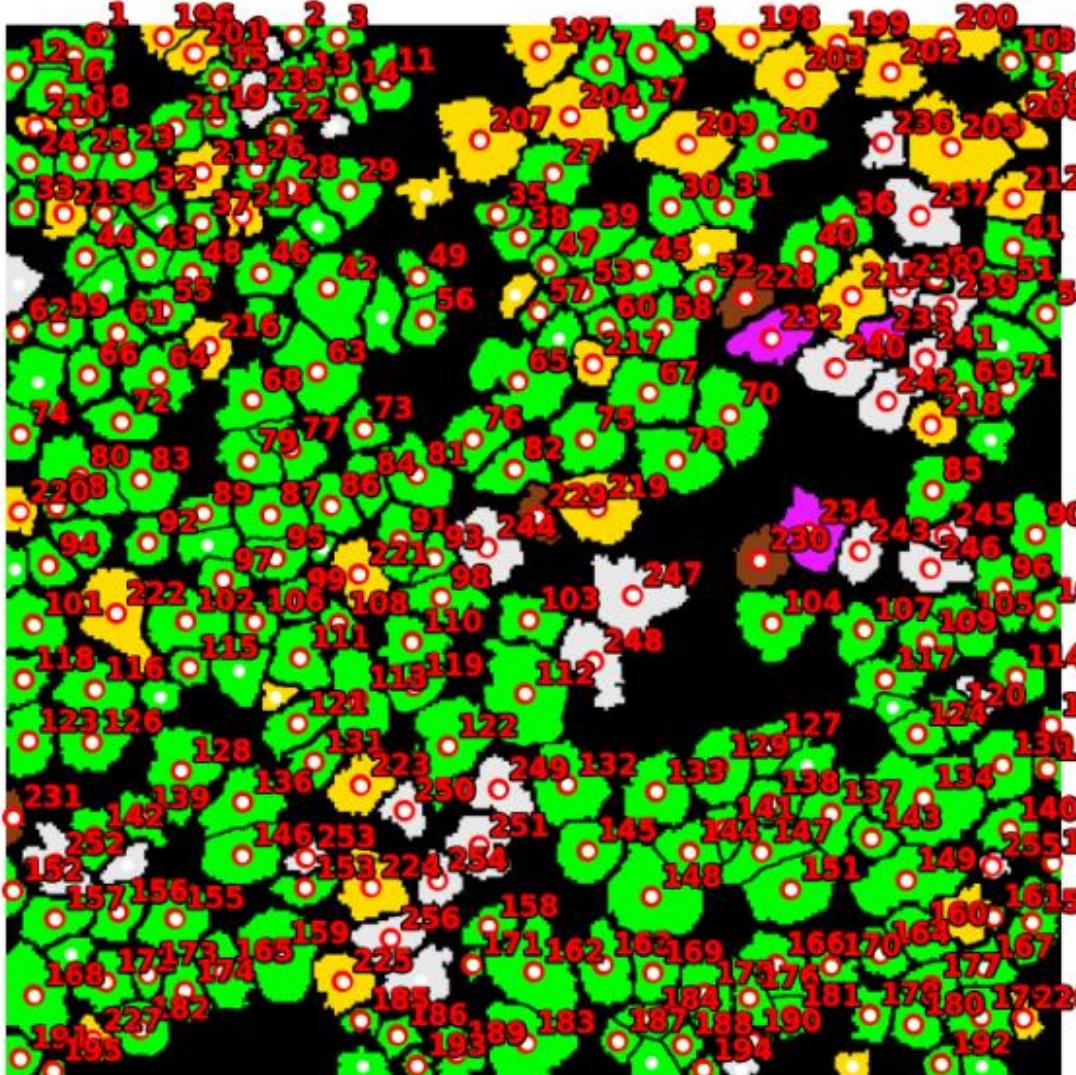
Идентификация крон деревьев кедра на снимках с определением:

- 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

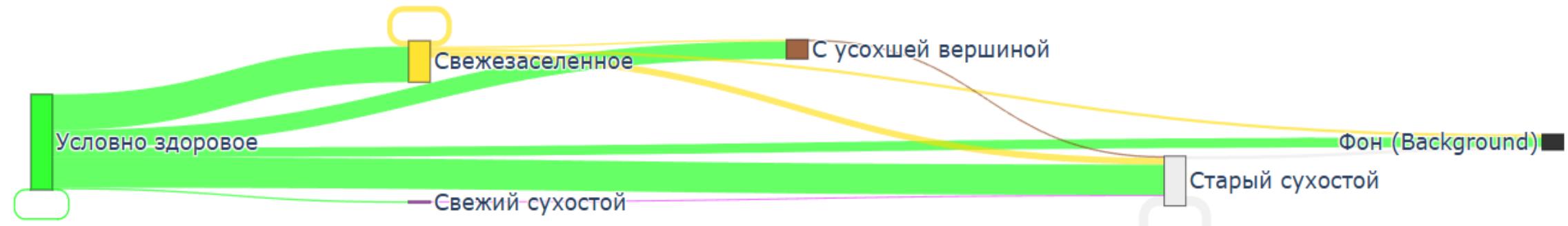


Сопоставление крон деревьев на снимках выполняется с помощью метода К-ближайших соседей (KNN), что обеспечивает более надёжное соответствие, поскольку центроиды крон не всегда совпадают. Это связано с тем, что GPS-координаты БПЛА, полученные в ходе двух разных полётов, могут различаться на 1–3 метра,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

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

Переходы классов деревьев (2023 → 2025)



- 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.

Предыдущее состояние \ Текущее состояние	Условно здоровое	Свежезаселенное	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 появившиеся (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.
- Стока «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^2) – 2023 и 2025 гг.

Предыдущее состояние \ Текущее состояние	Условно здоровое	Свежезаселенное	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^2 осталось в том же классе, 1191.49 м^2 перешло в класс «Свежезаселённое»; 476.70 м^2 — в класс «С усохшей вершиной»; 36.15 м^2 — в класс «Свежий сухостой»; 974.63 м^2 — в класс «Старый сухостой»; и 1635.02 м^2 — 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
Свежезаселенное	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 (количество пикселей) по классам

Состояние здоровья	Площадь в 2023 г. (м ²)	Площадь в 2025 г. (м ²)	Изменение площади (%)
Условно здоровое	4333.57	23.69	- 99.5
Свежезаселенное	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.

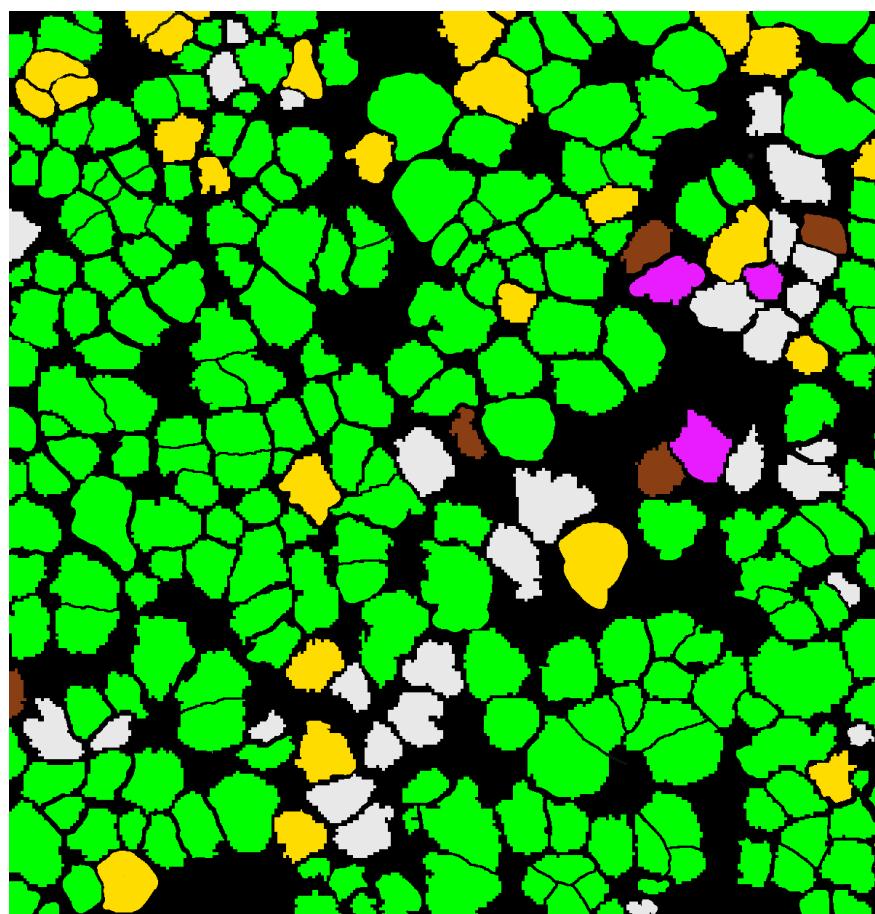
Сравнительный анализ двух традиционных методов и метода матрицы переходов (слайды 15, 16) позволяет утверждать, что последний обеспечивает более детальную характеристику динамики состояния здоровья деревьев. Предложенный метод позволяет отследить не только общие тренды, но и конкретные переходы: сколько 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.

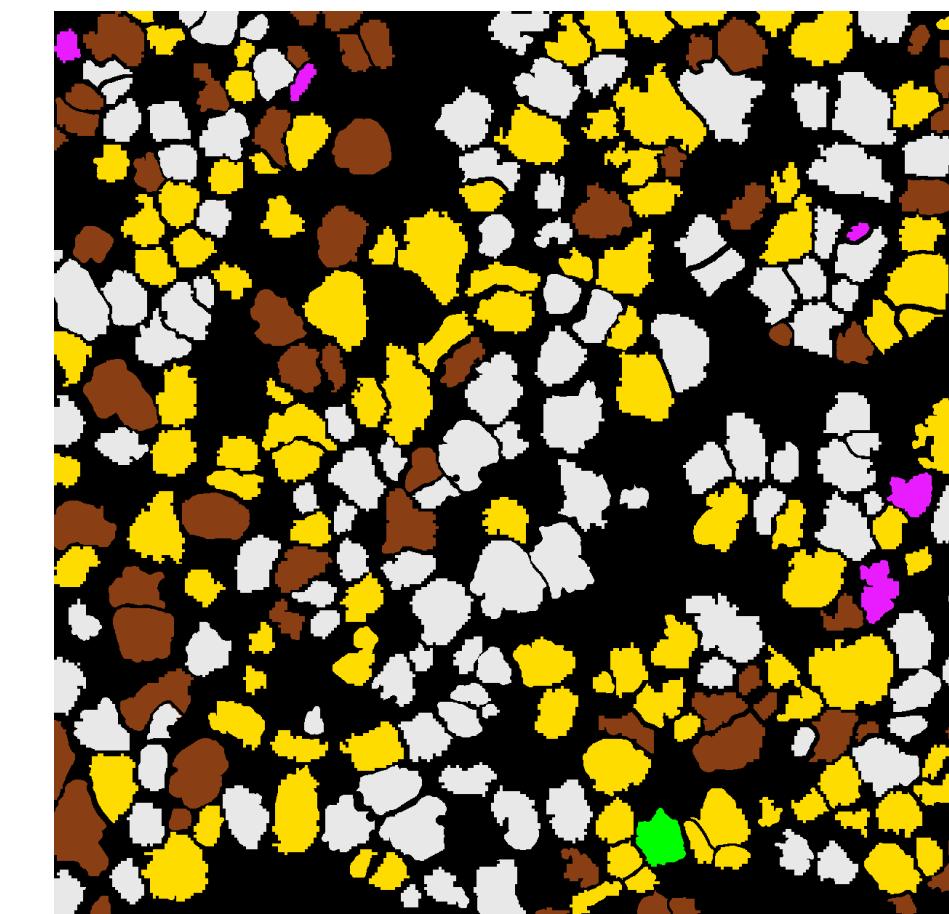
Экспертная разметка разновременных снимков

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	Условно здоровое	Свежезаселенное	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	Фон	Итого в 2023
Предыдущее состояние							
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	Условно здоровое	Свежезаселенное	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	Фон	Итого в 2023
Предыдущее состояние							
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 (m^2), полученные с помощью нейронной сети (2023 и 2025 гг.)

Предыдущее состояние \ Текущее состояние	Условно здоровое	Свежезаселенное	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

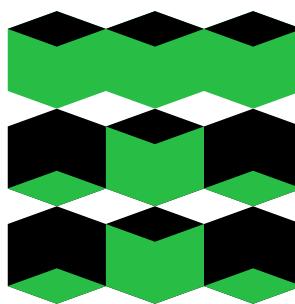
Результаты анализа динамики состояния здоровья деревьев путем оценки площади крон деревьев по классам (m^2), полученные экспертами (2023 и 2025 гг.)

Предыдущее состояние \ Текущее состояние	Условно здоровое	Свежезаселенное	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 кедра 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 кедра 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 кедра. 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"