



# УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ К АДДИТИВНЫМ ШУМАМ НА СНИМКАХ С БПЛА ДЕРЕВЬЕВ ПИХТЫ

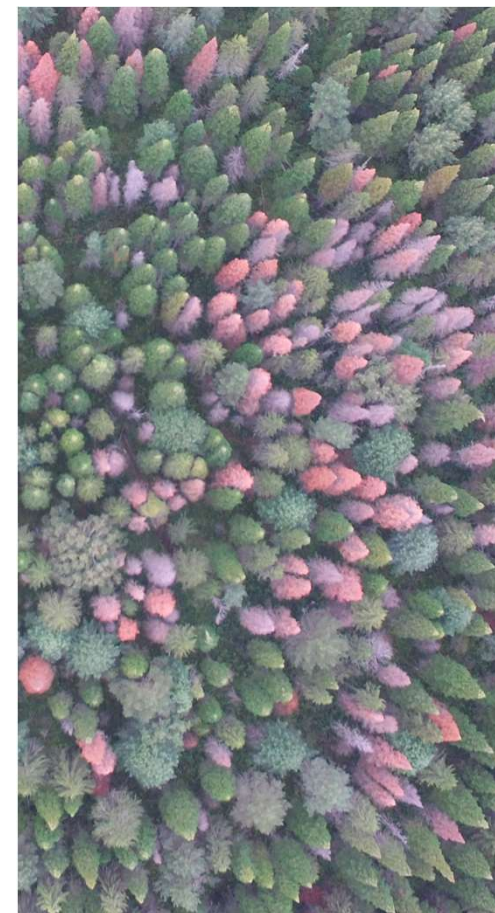
Малкин Артем Юрьевич

Марков Николай Григорьевич

*XXIII международная конференция  
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»  
11 ноября 2025 г.*

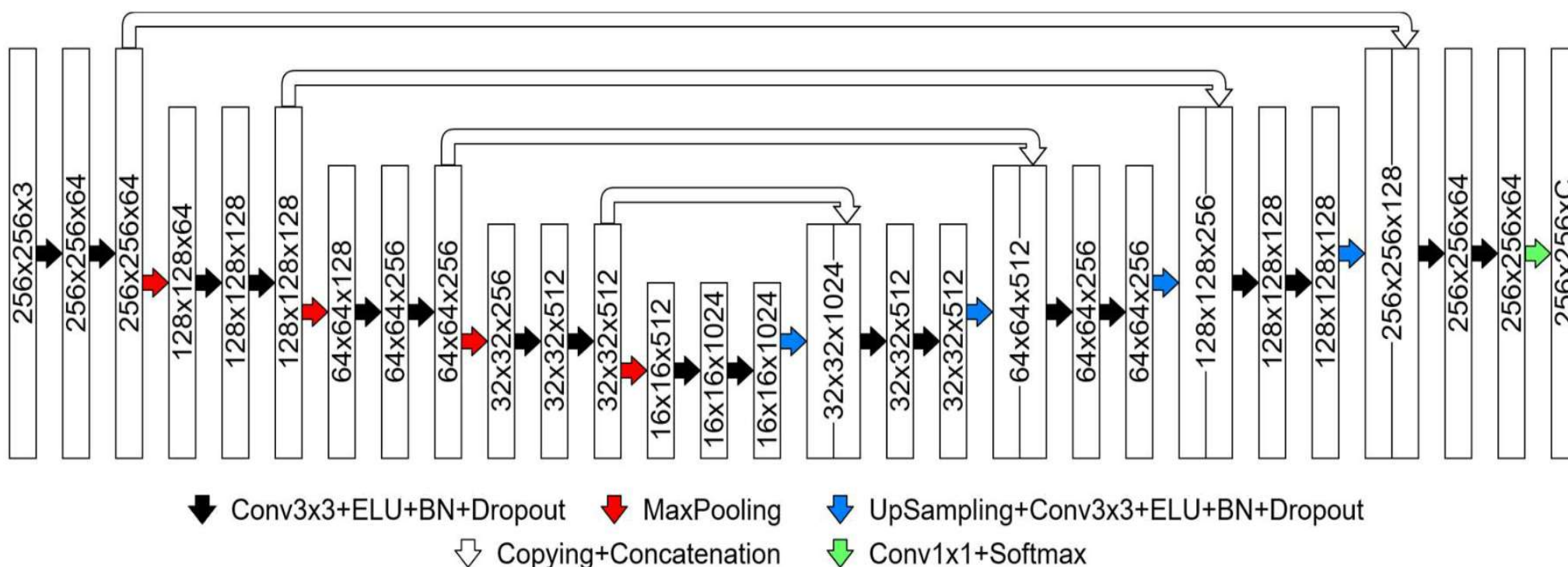
# Актуальность исследования

- Ежегодно значительные площади, занимаемые хвойными деревьями, подвергаются нашествию насекомых-вредителей.
- Для выявления очагов размножения вредителей и степени поражения ими хвойных деревьев ведется мониторинг лесов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащённых прецизионной аппаратурой для съемки.
- В последнее время для решения задачи автоматического распознавания состояния пораженных деревьев на полученных с БПЛА снимках начинают применять современные модели свёрточных нейронных сетей (далее – СНС).
- Часть снимков с БПЛА может быть зашумлена аддитивными шумами, поэтому актуально исследование эффективности моделей СНС при анализе таких снимков.



# Объект исследования.

## Архитектура модели Mo-U-Net



# Объект исследования.

## Робастная функция потерь Уэлша

- Робастная (устойчивая к шумам) функция потерь (РФП) Уэлша:

$$\rho(z) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\beta}\right)^2\right),$$

где  $z \in [0, 1]$  – величина ошибки предсказания,  $\beta$  – коэффициент функции потерь.

- Производная РФП Уэлша:

$$\rho'(z) = \frac{1}{\beta^2} z \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\beta}\right)^2\right).$$

# Цель и задачи исследования

**Цель работы** – исследовать устойчивость модели СНС Mo-U-Net с РФП Уэлша при решении задачи семантической сегментации (попискельной классификации) зашумленных аддитивными шумами снимков пораженных деревьев пихты *Abies Sibirica*, полученных с БПЛА.

## **Задачи:**

1. Реализовать на языке программирования Python модель СНС Mo-U-Net и РФП Уэлша, применяемые для сегментации снимков пораженных деревьев пихты.
2. Создать новый набор данных (датасет) с аддитивными случайными шумами на фрагментах снимков обучающей выборки.
3. Обучить модель СНС Mo-U-Net с РФП Уэлша на обучающей выборке с аддитивными случайными шумами.
4. Провести эксперименты с обученной моделью Mo-U-Net с использованием разработанного датасета и проанализировать её устойчивость к аддитивным случайным шумам на снимках.

# Метрики качества сегментации снимков

- Для оценки качества сегментации (точности классификации) деревьев пихты каждого класса с деревьев моделью Mo-U-Net применяется метрика IoU<sub>c</sub>:

$$\text{IoU}_c = \frac{\text{TP}_c}{\text{TP}_c + \text{FP}_c + \text{FN}_c},$$

где TP<sub>c</sub> – это истинно-положительные предсказания, FP<sub>c</sub> – ложно-положительные предсказания, FN<sub>c</sub> – ложно-отрицательные предсказания.

- Для оценки качества сегментации (точности классификации) деревьев также используется интегрированная метрика mean Intersection over Union (mIoU), рассчитываемая как среднее значение IoU<sub>c</sub> по всем N классам:

$$\text{mIoU} = \frac{1}{N} \sum_{c=1}^N \text{IoU}_c$$

- Будем считать метрики IoU<sub>c</sub> и mIoU мерами устойчивости к шумам исследуемой модели Mo-U-Net.
- Значения IoU<sub>c</sub> и mIoU > 0,5 говорят о высоком качестве сегментации и, соответственно, о высокой устойчивости модели СНС к шумам.



# Исходные снимки крон деревьев пихты

Для проведения исследований устойчивости модели Mo-U-Net к аддитивным шумам использовались снимки с БПЛА участка деревьев пихты, пораженных уссурийским полиграфом. Этот участок расположен в Бакcharском лесничестве (Парбигское участковое лесничество, окрестности поселка Парбиг) Бакcharского района Томской области. Его координаты:  $57^{\circ}16'35,2''$  С  $81^{\circ}30'18,7''$  В.

Пространственное разрешение снимков – 0,1м/пиксель.



# Исходный датасет, полученный по снимкам крон деревьев пихты

- 4 класса (жизненных состояний) пихты и «Фон», всего – 5 классов. Классы деревьев пихты: «Живое», «Отмирающее», «Свежий сухостой», «Старый сухостой».
- Разметка RGB-снимков и нарезка их на фрагменты размером 256x256x3 пикселей проведена сотрудниками ИМКЭС СО РАН и ТПУ.
- Исходный набор данных включает:
  - Обучающая выборка: 2004 фрагмента 256x256x3 пикселей.
  - Валидационная выборка: 672 фрагмента 256x256x3 пикселей.
  - Тестовая выборка: 91 фрагмент 256x256x3 пикселей.



# Формирование нового датасета с зашумленными фрагментами снимков деревьев пихты (1)

Измененные значения амплитуд яркости каждого из RGB-каналов  $\omega(x,y)$  зашумленного искусственным образом пикселя вычисляются по формуле:

$$\omega(x, y) = s(x, y) + n(x, y),$$

где  $x$  и  $y$  – координаты пикселя, на который будет накладываться шум;  $s(x,y)$  – начальные (исходные) значения амплитуды яркости пикселей каждого из RGB-каналов;  $n(x,y)$  – случайная амплитуда накладываемого на полезный сигнал шума (изменения значений амплитуды яркости пикселей RGB-каналов).

При этом амплитуда аддитивного шума представлена случайной величиной, полученной из распределения Гаусса (нормальное распределение), задаваемого функцией плотности вероятности:

$$f(k) = \frac{1}{q\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{(k-M)^2}{2q^2}},$$

где  $k$  – значение амплитуды помехи, вычисляемое как вероятность включения этого значения в диапазон  $[M-q; M+q]$ ;  $M$  – математическое ожидание случайной величины,  $q$  – ее среднеквадратичное отклонение.

## Формирование нового датасета с зашумленными фрагментами снимков деревьев пихты (2)



a



b



c



d

*Зашумление фрагмента снимка деревьев пихты: a – исходный фрагмент; наложение аддитивного шума, математическое ожидание  $M$  и среднеквадратичное отклонение  $q$  которого, соответственно, составляют: b – 15 и 0,5; c – 20 и 0,5; d – 20 и 2.0*

# Проводимые эксперименты (1)

Степень зашумления фрагментов обучающей выборки нового датасета регулируются, как это было показано ранее, путем задания значений двух параметров случайного шума:  $M$  и  $q$ . Проводятся две серии экспериментов по определению устойчивости модели Mo-U-Net с РФП Уэлша к аддитивным шумам.

В первой серии экспериментов значения параметров аддитивных шумов меняются следующим образом: значения параметра  $M$  берутся в диапазоне от 10 до 20 с шагом 5, при этом значение  $q$  постоянно и составляет 2,0. Во второй серии экспериментов фиксируется значение параметра  $M$ , равного 20, при варьировании значений  $q$  в диапазоне от 0,5 до 2,0 с шагом 0,5. По сути в каждой паре значений параметров  $M$  и  $q$  при обучении модели Mo-U-Net использовалась новая выборка, фрагменты которой имели аддитивный шум с заданными значениями  $M$  и  $q$ , однако при оценке устойчивости модели во всех экспериментах применялись неизменяемые валидационная и тестовая выборки.

## Проводимые эксперименты (2)

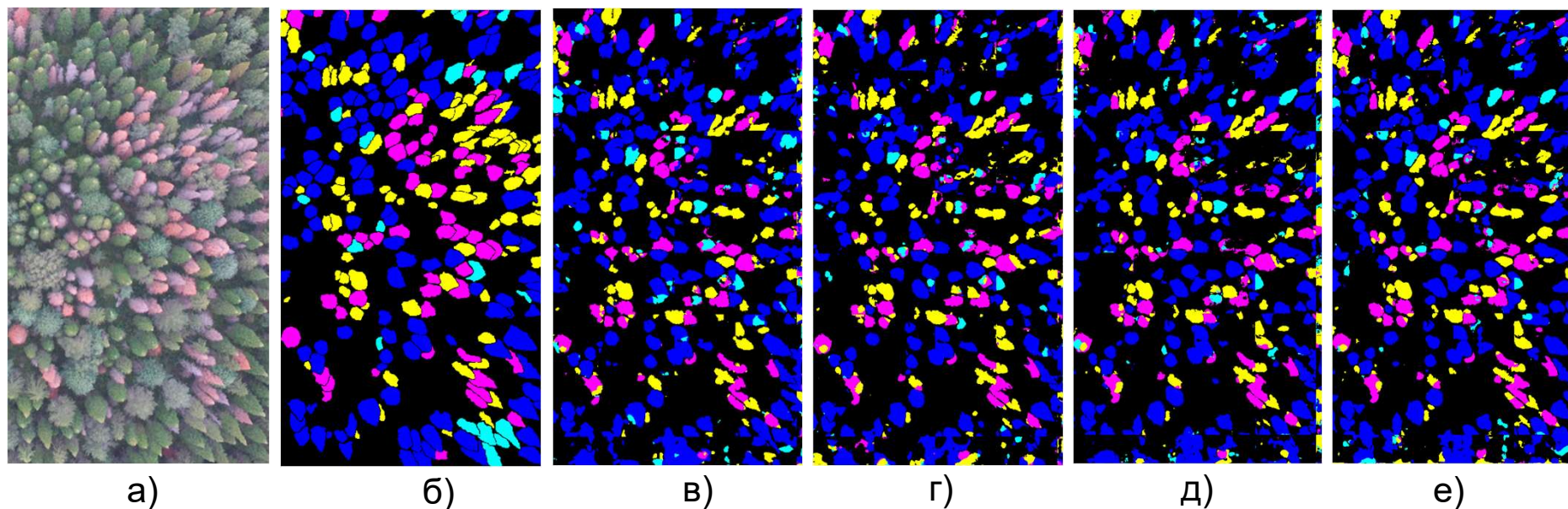
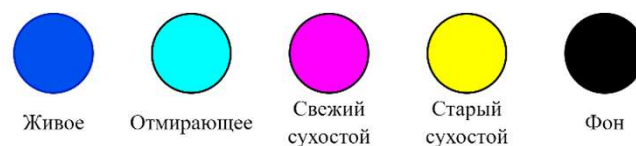
Также получены результаты обучения и тестирования модели на исходном датасете, т.е. без зашумленных фрагментов обучающей выборки.

Во всех экспериментах в начале в течение 50 итераций определяется квазиоптимальное значение коэффициента  $\beta$  РФП Уэлша в диапазоне  $[0,001; 9,000]$ , при котором модель демонстрирует максимальное значение метрики mIoU на валидационной выборке.

Выбор пикселей на фрагменте для зашумления осуществлялся случайным образом по равномерному закону распределения.

# Визуальные результаты сегментации тестового снимка

Случай варьирования значений  $M, q$  – постоянно и равно 2,0



Сегментация тестового снимка моделью Mo-U-Net: а) исходные данные; б) эталонная разметка экспертом; в) случай отсутствия аддитивных шумов; г) случай аддитивных шумов  $M = 10, q = 2,0$ ; д) случай аддитивных шумов  $M = 15, q = 2,0$ ; е) случай аддитивных шумов  $M = 20, q = 2,0$

Результаты сегментации фрагментов тестовой выборки (точность классификации деревьев по метрикам IoUc и mIoU).  
 Случай варьирования значений M, q – постоянно и равно 2,0

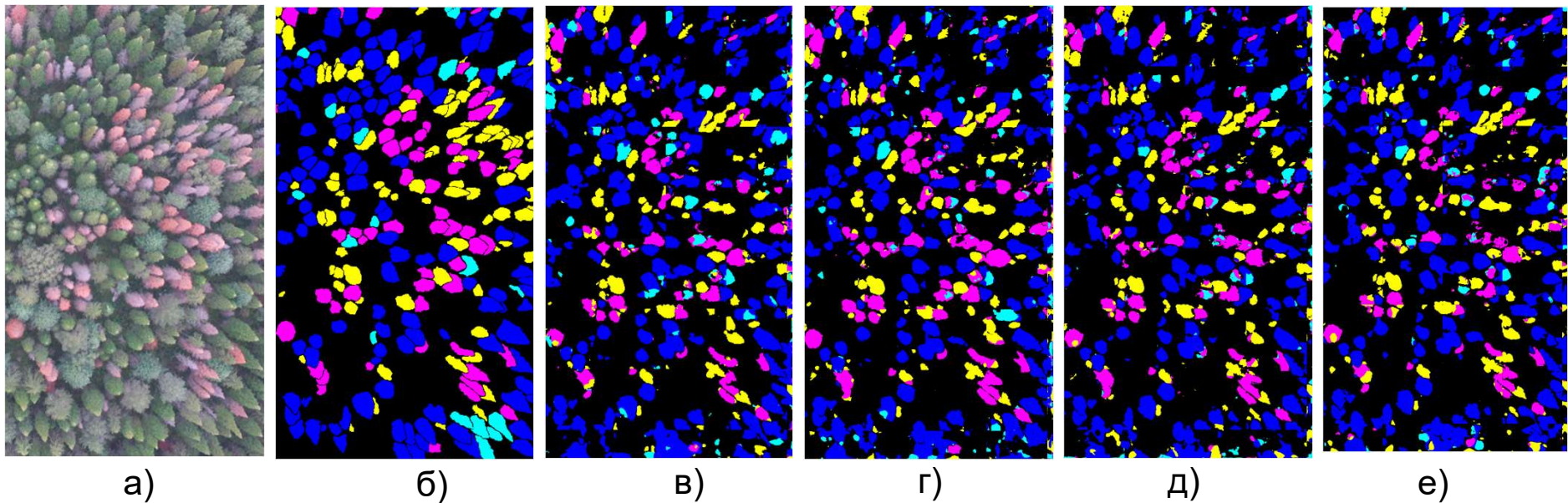
Таблица 1

Параметры аддитивных шумов		Квази- оптимальное значение коэф-та $\beta$	IoUc					mIoU
			Живое	Отмирающее	Свежий сухостой	Старый сухостой	Фон	
Нет шумов		3,0452	0,70	0,25	0,76	0,60	0,84	0,63
10	2,0	1,4453	0,68	0,27	0,75	0,62	0,83	0,63
15	2,0	7,1352	0,67	0,28	0,73	0,60	0,83	0,62
20	2,0	3,7541	0,67	0,27	0,74	0,61	0,82	0,62



# Визуальные результаты сегментации тестового снимка.

Случай варьирования значений  $q$ ,  $M$  – постоянно и равно 20



Сегментация тестового снимка моделью Mo-U-Net: а) исходные данные; б) эталонная разметка экспертом; в) случай отсутствия аддитивных шумов; г) случай аддитивных шумов  $M = 20$ ,  $q = 0,5$ ; д) случай аддитивных шумов  $M = 20$ ,  $q = 1,0$ ; е) случай аддитивных шумов  $M = 20$ ,  $q = 1,5$



Таблица 2

Результаты сегментации фрагментов тестовой выборки (точность классификации деревьев по метрикам  $IoU_c$  и  $mIoU$ ).  
Случай варьирования значений  $q$ ,  $M$  – постоянно и равно 20

Параметры аддитивных шумов		Квази-оптимальное значение коэф-та $\beta$	$IoU_c$					$mIoU$
			Живое	Отмирающее	Свежий сухостой	Старый сухостой	Фон	
Нет шумов		3,0452	0,70	0,25	0,76	0,60	0,84	0,63
20	0,5	5,1553	0,72	0,25	0,74	0,60	0,85	0,63
20	1,0	3,9096	0,70	0,27	0,73	0,61	0,84	0,63
20	1,5	1,9194	0,69	0,28	0,73	0,61	0,84	0,63
20	2,0	3,7541	0,67	0,27	0,74	0,61	0,82	0,62

# Заключение

Программно реализована, обучена и валидирована модель СНС Mo-U-Net с РФП Уэлша с применением нового датасета, разработанного на основе известного датасета. Новый датасет имеет обучающую выборку с зашумленными аддитивными шумами фрагментами. Проведено исследование устойчивости модели Mo-U-Net для различных значений параметров случайного шума.

По результатам исследования показано, что по метрике mIoU на тестовой выборке модель демонстрирует устойчивость к аддитивным шумам, при этом значения этой метрики незначительно снижаются с 0,63 (без шума) до 0,62. Можно полагать, что РФП Уэлша способствует устойчивости исследуемой модели Mo-U-Net к аддитивным шумам при решении задачи попиксельной классификации снимков деревьев пихты.

Однако для деревьев класса «Отмирающее» значения метрики IoUc составляют 0,25–0,28, что значительно меньше порогового значения 0,5 и говорит об отсутствии устойчивости модели в случае деревьев этого класса. Одной из причин является малое число деревьев этого класса (дисбаланс классов) в обучающей выборке.



# УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ К АДДИТИВНЫМ ШУМАМ НА СНИМКАХ С БПЛА ДЕРЕВЬЕВ ПИХТЫ

Малкин Артем Юрьевич  
Марков Николай Григорьевич

*XXIII международная конференция  
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»  
11 ноября 2025 г.*