

Двадцать третья международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"
10 - 14 ноября 2025 г. Москва, ИКИ РАН

Методы и алгоритмы обработки спутниковых данных



Поиск мелкоразмерной изменчивости спутниковых изображений по спектру матрицы перепадов яркости изображений

Алексанина М.Г.^{1,2}, Сизоненко Г.Г.^{1,2}

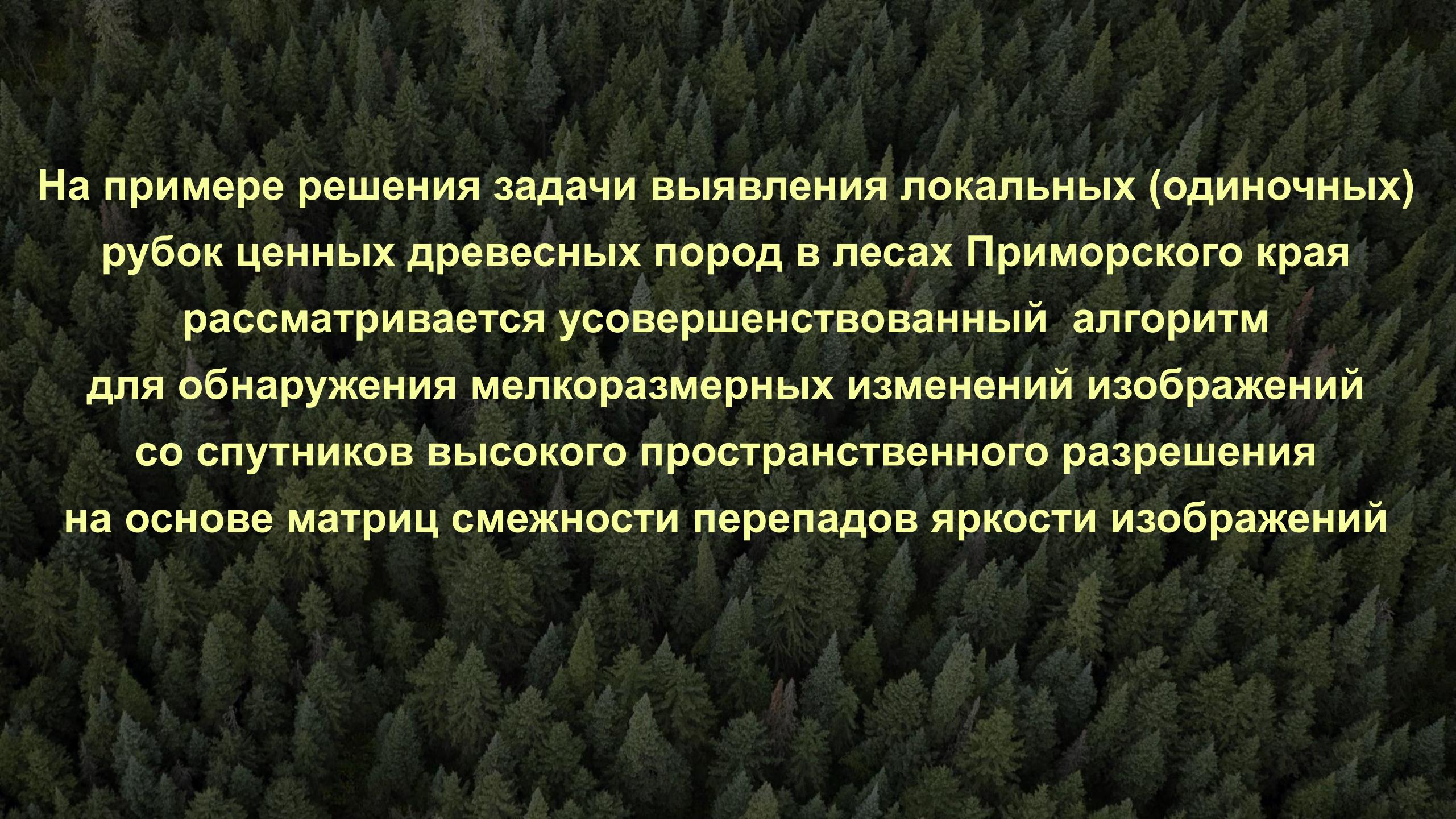
margeo@mail.ru



¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Владивосток, Россия



На примере решения задачи выявления локальных (одиночных) рубок ценных древесных пород в лесах Приморского края рассматривается усовершенствованный алгоритм для обнаружения мелкоразмерных изменений изображений со спутников высокого пространственного разрешения на основе матриц смежности перепадов яркости изображений

Актуальность

обусловлена ЦЕЛЯМИ и задачами Стратегии развития ПК до 2030 года

Стратегия социально-экономического развития Приморского края до 2030 года,
Постановление Администрации
Приморского края от 28 декабря 2018
года №668-па.

Направление – «Развитие
лесопромышленного комплекса.

Задача 3. Обеспечение ответственного
лесопользования путем лесоустройства
и осуществления мониторинга лесов».

Разработка фундаментальных основ
обработки спутниковой информации,
создание новых методов и развитию
геоинформационных технологий для
решения задач картографирования
природно-хозяйственных систем на
примере мониторинга лесов
(смешанные леса) в Приморском крае.

Основное направление работ -
создание средств контроля
изменчивости состояния леса и, в
 первую очередь, его рубок.

Ключевой вопрос - применение
спутниковых технологий
дистанционного наблюдения Земли для
мониторинга и изучения природно-
хозяйственных систем
и объективного детектирования
происходящих в этих системах
изменений.

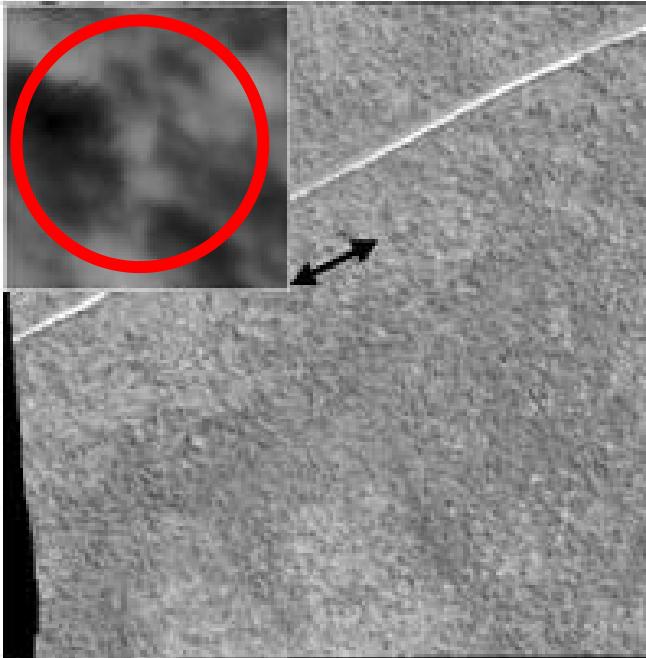
Цель работы



Исходные данные

- Российский спутник Ресурс-П, панхроматический диапазон, пространственное разрешение 0.7 м.
- Участки лесного полога до рубки и после, совмещенные с пиксельной точность, выровненные и эквализированные.

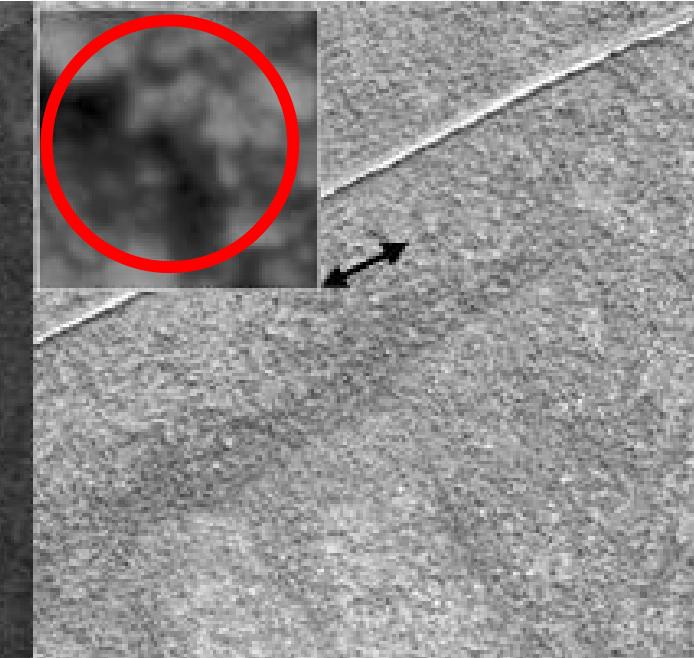
31.07.2015, угол крена 26°



25.08.2015, угол крена 1°



15.09.2015, угол крена 4°



Предварительная подготовка данных

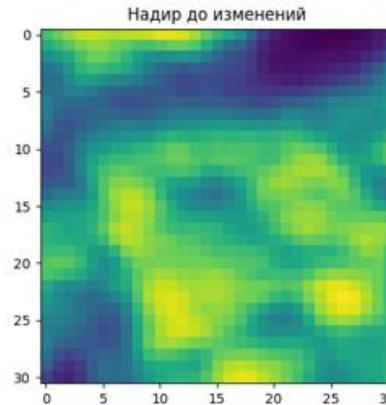
геопривязка

выравнивание
гистограмм
яркости

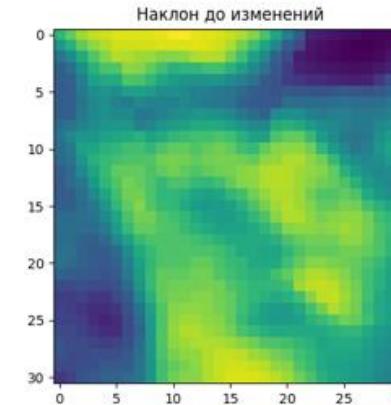
квантование по
уровням яркости
на 8/16/32

Рассматриваемые участки

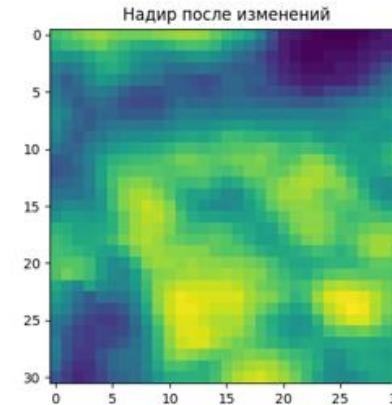
надир до изменений



наклон до изменений

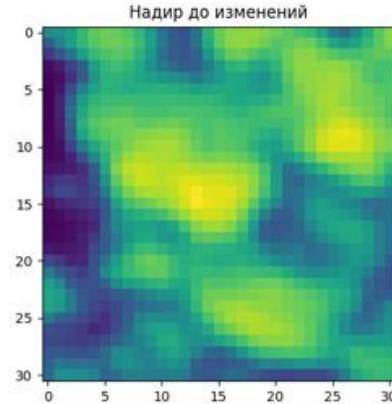


надир после изменений

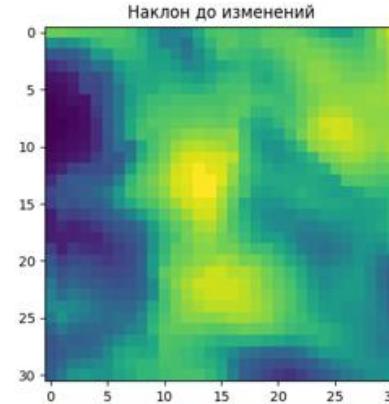


Участок без рубок

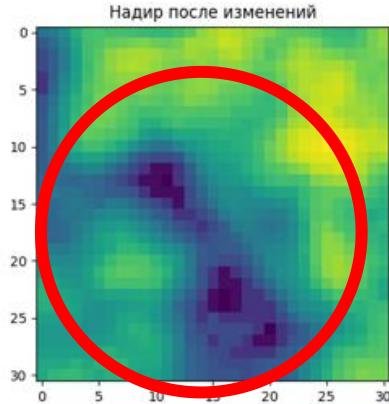
надир до изменений



наклон до изменений



надир после изменений



Участок с рубкой

Создание нового,
устойчивого к вариациям условий съемки,
алгоритма

для обнаружения редких мелкоразмерных
изменений изображений базируется на анализе
матриц смежности перепадов яркости- МСПЯ

(*Алексанина, Храмцова, 2024).

**Алексанина М.Г., Храмцова А.В. Обнаружение мелкомасштабной
изменчивости лесного полога на спутниковых панхроматических
изображениях на основе матрицы смежности перепадов яркости //
Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из
космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 47-59. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-47-59*

Используемый подход - от матрицы смежности яркости (МСЯ) к матрице смежности перепадов яркости (МСПЯ)

Цель - быстрая (вычислительно) локализация мест изменчивости

Идея:

анализ перепадов яркости (Δ)

для заданного смещения и уровней яркостей.

Преимущества:

Устойчивость к условиям съемки

В отличие от классических подходов, фокусирующихся на абсолютных значениях яркости, предлагаемый подход исследует изменения перепадов яркости изображений.

Для заданного лага и направления рассматривается перепад яркости Δ_{ij} на первом изображении и перепад Δ_{lj} в тех же пикселях на втором изображении. Результат сравнения заносится в ячейку ij матрицы смежности перепадов.

Перепад на 1-м\ перепад на 2-м изображении	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$	$\Delta 4$
$\Delta 1$	Число перепадов $\Delta 1-\Delta 1$	Число перепадов $\Delta 2-\Delta 1$	Число перепадов $\Delta 3-\Delta 1$	Число перепадов $\Delta 4-\Delta 1$
$\Delta 2$	Число перепадов $\Delta 1-\Delta 2$	Число перепадов $\Delta 2-\Delta 2$	Число перепадов $\Delta 3-\Delta 2$	Число перепадов $\Delta 4-\Delta 2$
$\Delta 3$	Число перепадов $\Delta 1-\Delta 3$	Число перепадов $\Delta 2-\Delta 3$	Число перепадов $\Delta 3-\Delta 3$	Число перепадов $\Delta 4-\Delta 3$
$\Delta 4$	Число перепадов $\Delta 1-\Delta 4$	Число перепадов $\Delta 2-\Delta 4$	Число перепадов $\Delta 3-\Delta 4$	Число перепадов $\Delta 4-\Delta 4$

Матрица смежности перепадов яркости (МСПЯ)

МСПЯ																
1(надир без рубки)-2(надир без рубки)																
-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-6	0	0	8	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5	0	0	4	17	11	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4	0	0	3	16	35	38	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
-3	0	0	0	3	22	76	46	6	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	0	0	0	1	5	46	163	146	17	2	0	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	11	73	198	142	25	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	12	82	853	121	15	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	2	7	77	177	85	13	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	2	2	13	68	150	61	13	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	3	5	43	131	53	10	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	16	57	39	4	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	10	23	18	2	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	22	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

МСПЯ																
1(надир до рубки)-2(надир с рубкой)																
-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5	0	0	0	0	7	7	4	2	3	7	1	1	0	0	0	0
-4	0	0	0	3	11	20	15	9	3	10	8	4	1	0	0	0
-3	0	0	0	2	13	29	24	16	13	17	15	22	1	0	0	0
-2	0	0	0	3	13	24	79	56	23	27	14	21	4	0	0	0
-1	0	0	0	2	6	21	83	175	126	47	26	13	5	0	0	0
0	0	0	0	3	12	19	44	117	912	142	28	7	2	0	0	0
1	0	0	0	5	22	13	17	37	149	236	99	20	3	0	0	0
2	0	0	0	0	2	12	14	25	31	55	34	5	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	2	2	4	8	24	27	15	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	7	10	9	3	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

МСПЯ																
1(надир без рубки)-3(под углом без рубки)																
-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5	0	0	0	0	0	1	4	1	7	6	2	0	0	0	0	0
-4	0	0	0	11	12	16	10	13	9	5	3	0	0	0	0	0
-3	0	0	3	10	12	24	19	19	11	5	2	0	0	0	0	0
-2	0	0	1	10	26	40	39	42	40	14	5	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	4	12	50	102	129	61	24	13	5	1	0	0	0
0	0	0	0	1	4	32	90	121	73	72	42	23	7	2	0	0
1	0	0	0	0	0	14	24	78	107	117	81	49	19	2	0	0
2	0	0	0	0	0	2	6	27	69	89	74	48	22	15	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	7	27	47	42	16	30	18	6	0
4	0	0	0	0	0	1	1	3	11	23	24	43	10	22	11	2
5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	6	16	10	12	13	17	5
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	12	2
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Разность МСПЯ до рубки и после рубки																
-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5	0	0	0	0	0	1	5	7	-9	-5	-6	-3	-2	0	0	0
-4	0	0	0	0	1	37	8	0	-8	-11	-8	-10	-7	0	0	0
-3	0	0	0	3	9	18	30	-5	-15	-7	-29	-9	0	0	0	0
-2	0	0	0	5	24	32	26	-14	-11	-33	-13	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	4	1	21	12	-28	-45	-16	-2	0	0	0	0
0	0	0	0	1	-12	-17	-26	13	31	-5	9	4	-8	0	0	0
1	0	0	0	-6	-26	-20	-17	-22	-6	40	21	6	1	0	0	0
2	0	0	0	0	-11	-13	-10	-19	11	31	48	9	4	0	0	0
3	0	0	0	0	-7	-3	-1	-1	-2	-3	42	22	2	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-6	0	13	3	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

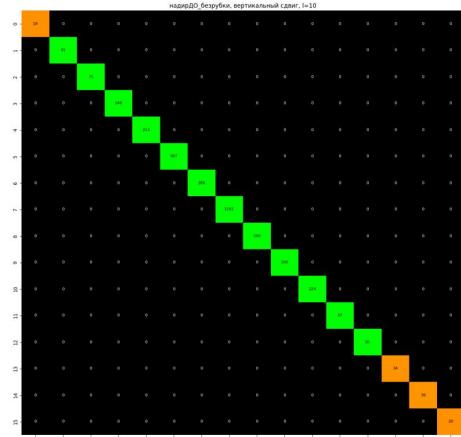
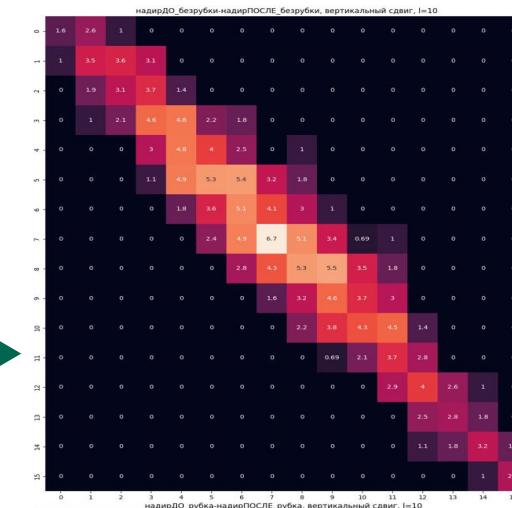
БЕЗ РУБКИ
При идентичных текстурах 2-х изображений матрица смежности перепадов яркости выглядит как **диагональная** - ненулевые значения по диагонали и расположены далее и несимметрично от главной диагонали матрицы.

С РУБКОЙ
При наличии изменений типа рубок в матрице смежности появляются **ненулевые** значения, отстоящие от диагонали и расположенные компактно.
Это можно использовать для идентификации рубок.

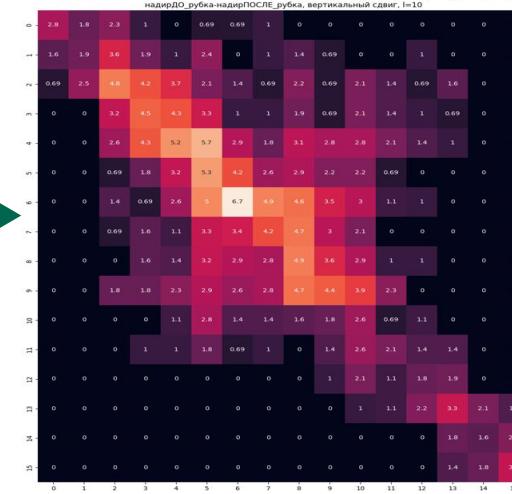
Иллюстрация подхода МСПЯ

Сценарий	Результат МСПЯ
Идентичные изображения	Строго на диагонали
Участок без рубки	~90% на диагонали
Участок с рубкой	Участки вне диагонали

Идентичные изображения



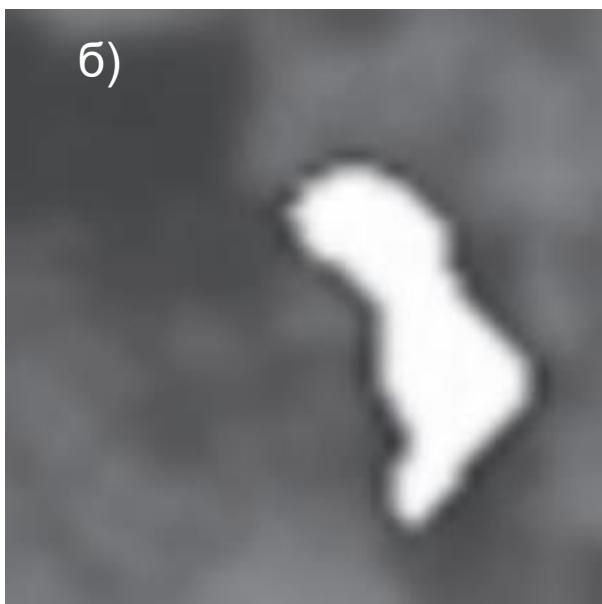
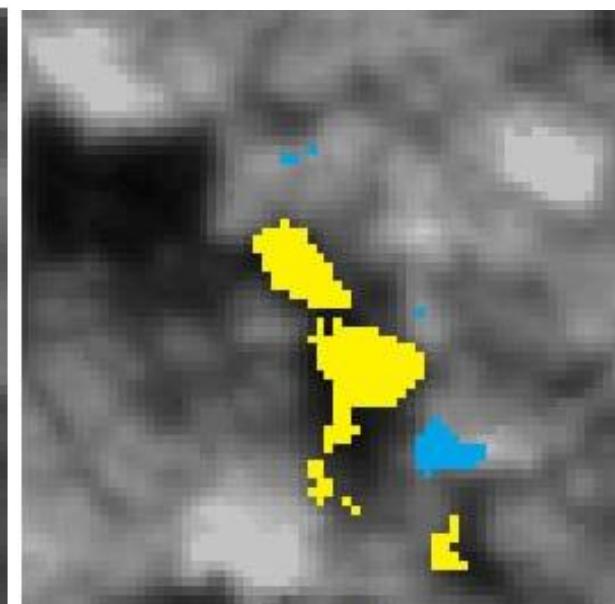
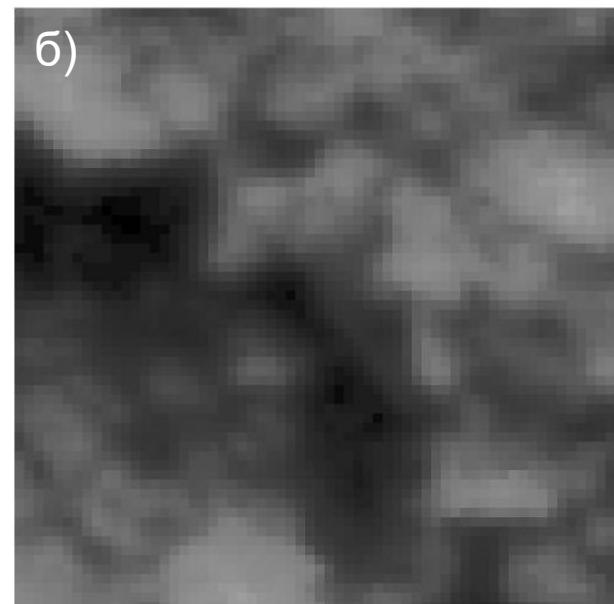
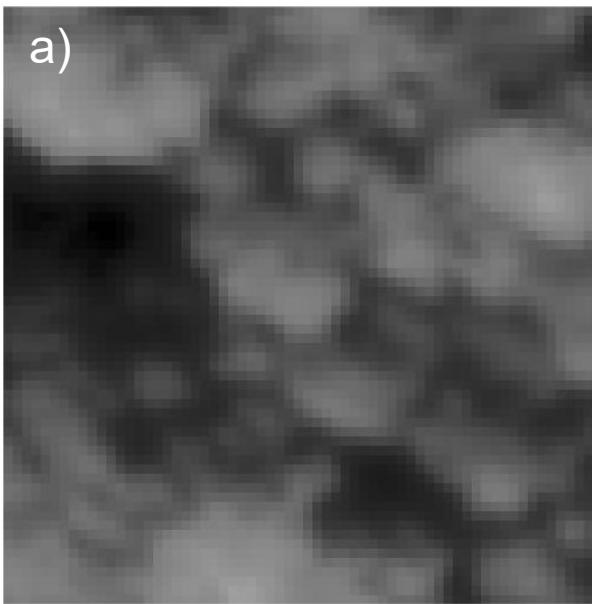
Участок без рубки



Участок с рубкой

Результат работы ранее разработанного подхода МСПЯ *

Параметры работы алгоритма – лаг -10, число уровней квантования 8, участок 64x64 пикселя



а) участок до рубки

б) участок после рубки

в) результат алгоритма

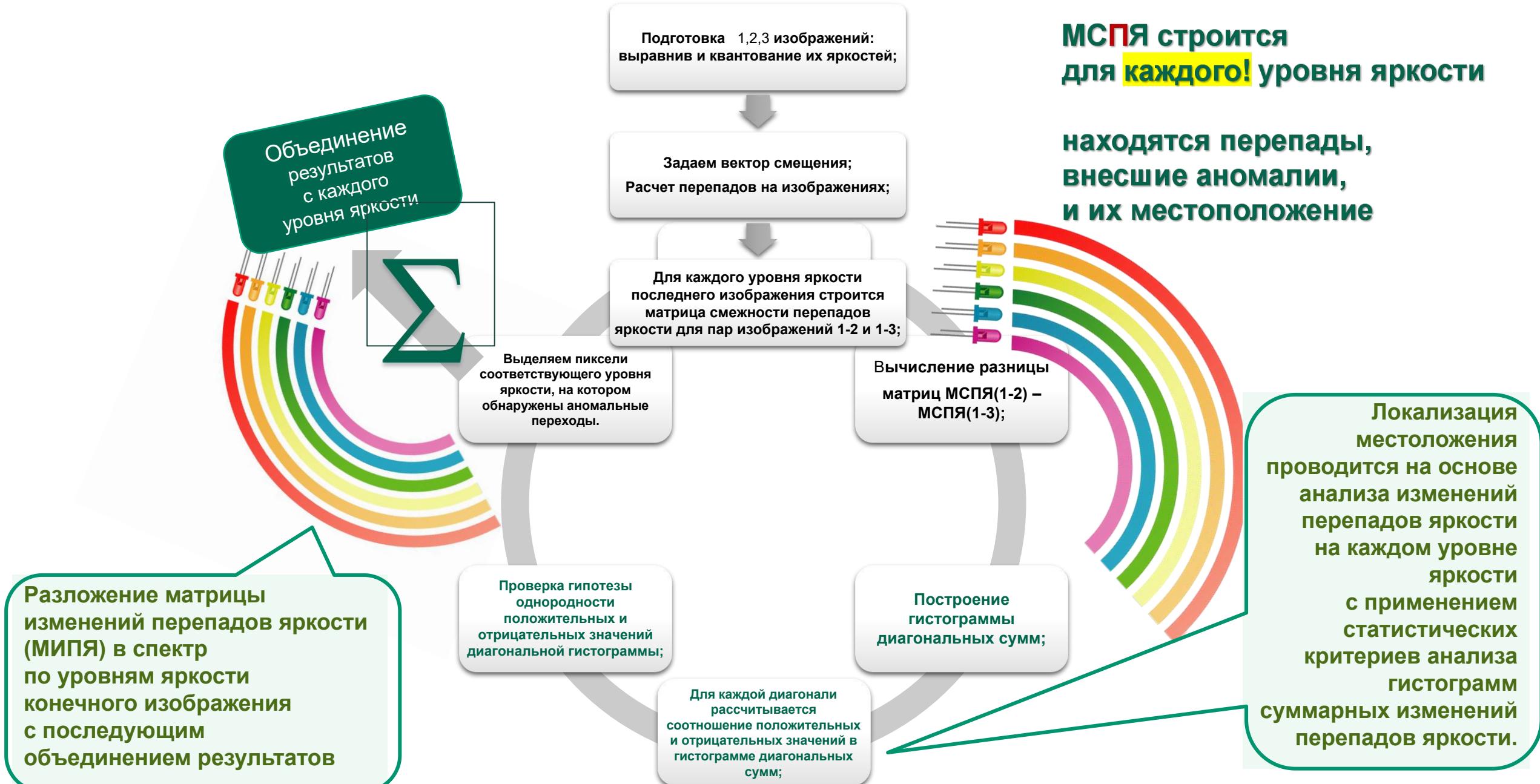
г) «эталон»

На основании выявленной особенности МСПЯ был предложен алгоритм идентификации ассиметрично расположенных относительно главной диагонали элементов матрицы. По выявленным ассиметричным элементам матрицы изменений перепадов яркости, соответствующих аномальным переходам перепадов яркости на рассматриваемых изображениях, определяются мелкоразмерные аномальные яркостные изменения на изображениях.

Недостаток - не было математически формализованного определения аномалии МСПЯ

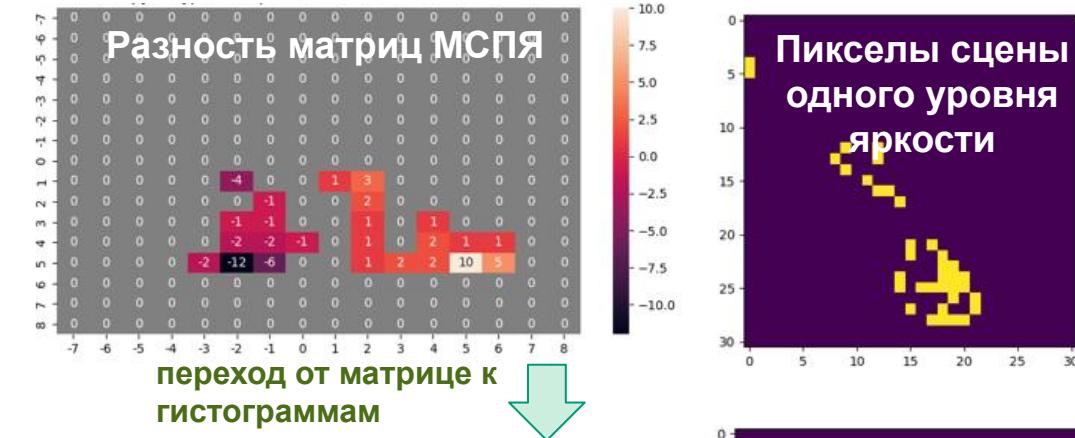
*Алексанрина М.Г., Храмцова А.В. Обнаружение мелкомасштабной изменчивости лесного полога на спутниковых панхроматических изображениях на основе матрицы смежности перепадов яркости // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 47-59. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-47-59

Усовершенствованный алгоритм МСПЯ (с разложением в спектр по яркости) - математическая формализация определения аномалии МСПЯ

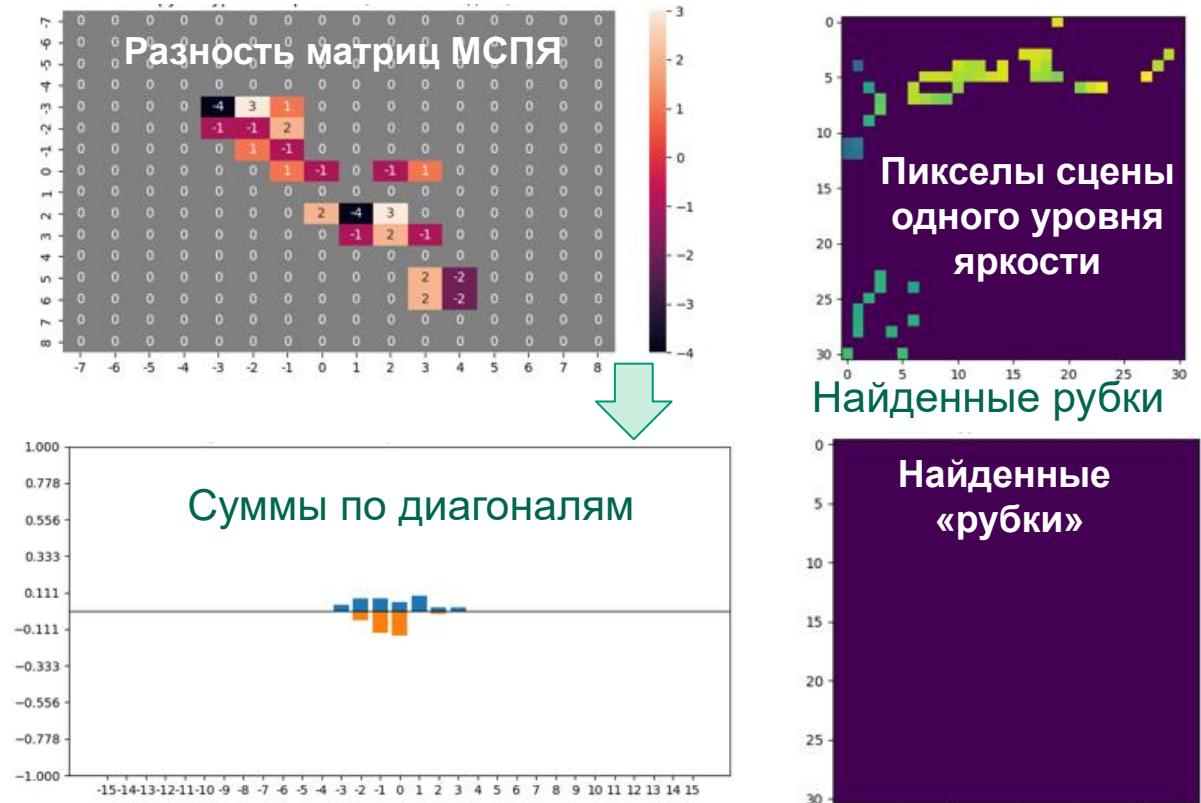


Разложение МСПЯ в спектр по яркости

Участок с рубкой на одном из 8 уровней яркости

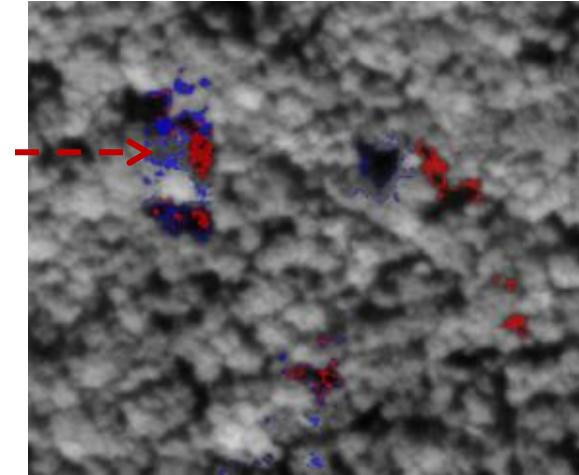
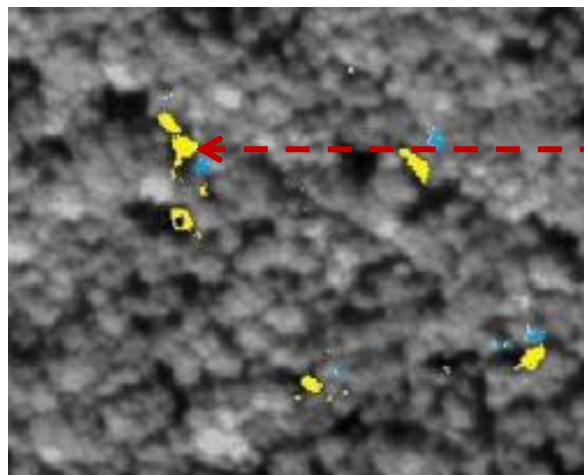
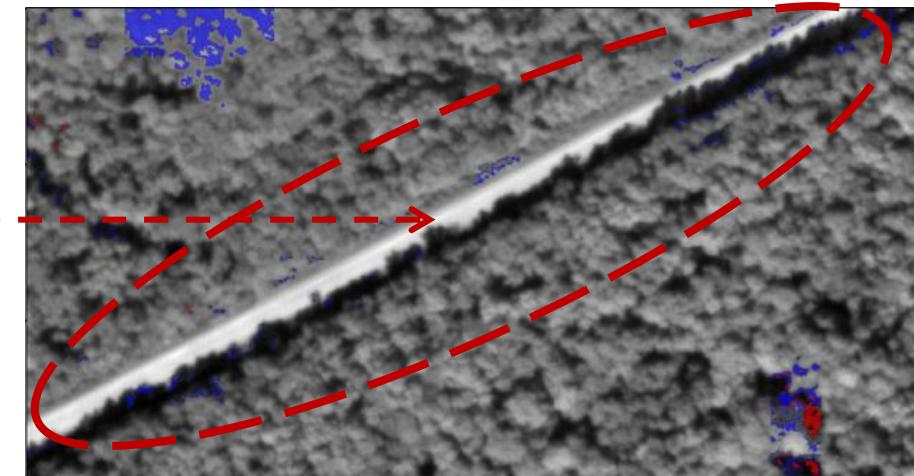
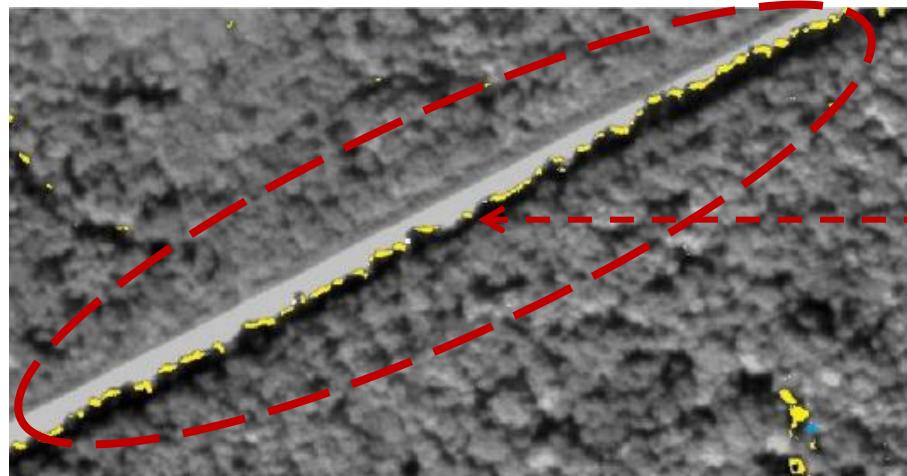


Участок без рубок на одном из 8 уровней яркости



Синее – положительные значения
Оранжевое – отрицательные значения
Зеленое – превышение >10%

Сравнение результатов МСПЯ без спектра и со спектром



Исходный алгоритм МСПЯ

Желтое - рубки

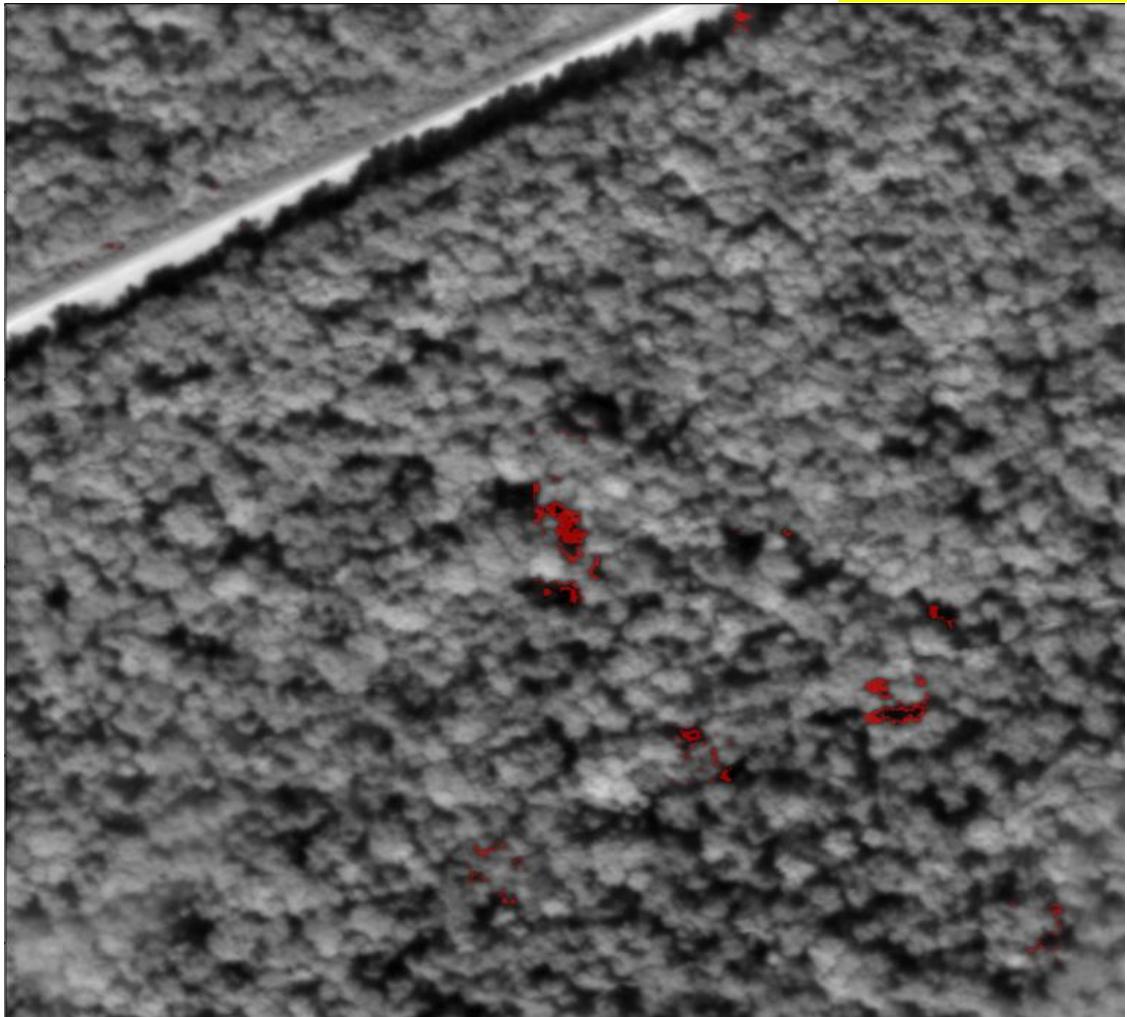
Голубое – появившиеся осветления

Новый алгоритм МСПЯ с разложением в спектр по яркости

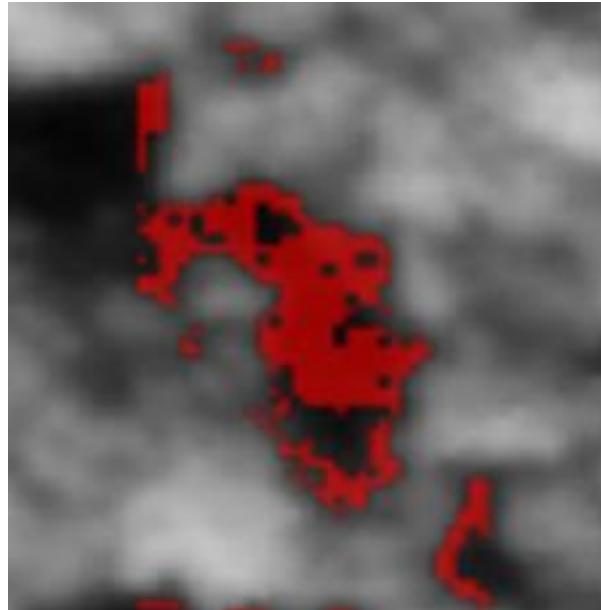
Красное - рубки

Синее – появившиеся осветления

Сравнение работы алгоритма МСПЯ с разложением в спектр по яркости с эталонным участком



Результат работы алгоритма
Красное – рубки



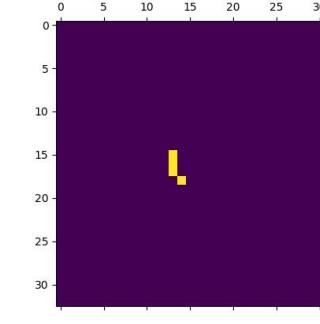
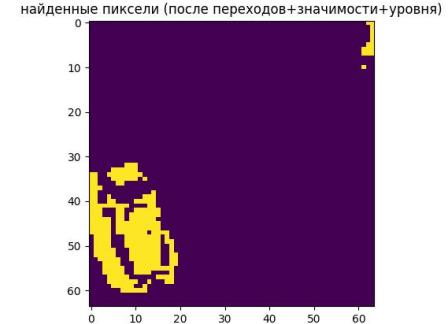
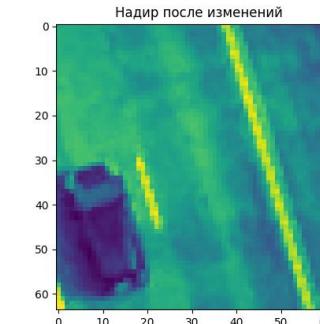
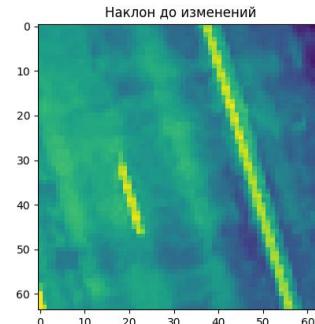
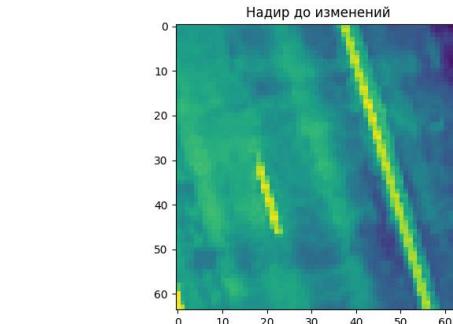
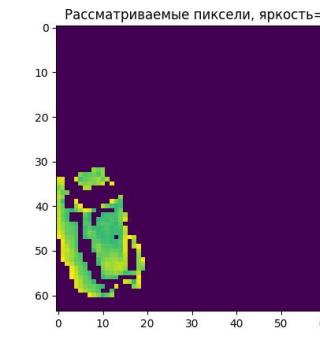
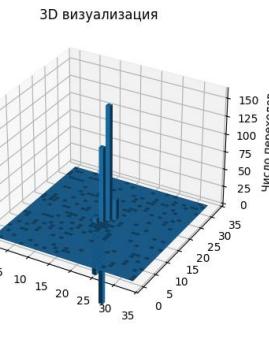
Увеличенный участок
в зоне
подтвержденной рубки



**Подтвержденная рубка
Фондом дикой природы
(WWF)**

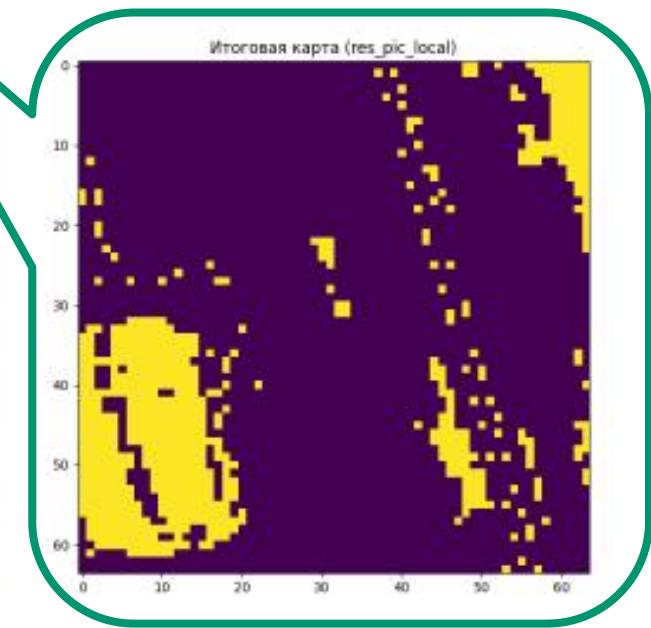
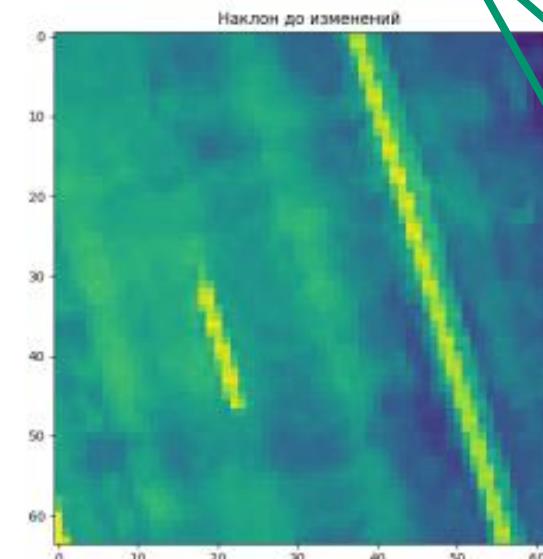
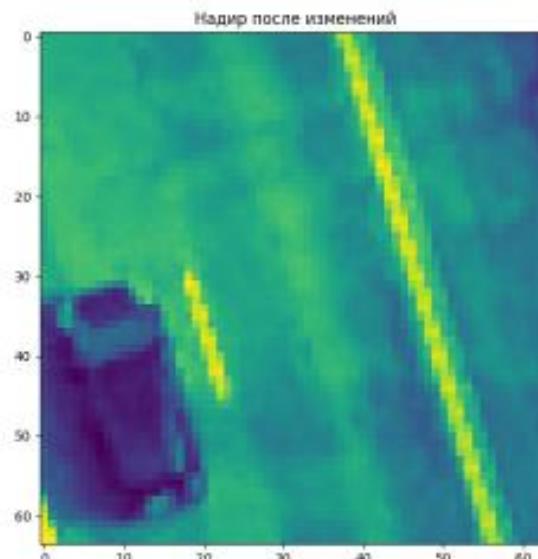
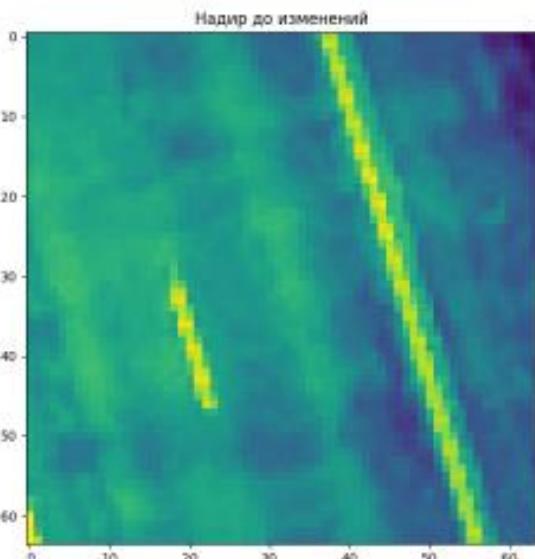
Выделение алгоритмом МСПЯ со спектром машинок на изображениях с БПЛА

Для уровня яркости 2 и критерием проверки однородности Вилкоксона 10%:



Итоговой результат алгоритма МСПЯ с разложением в спектр по яркостям

результаты выявленных аномалий перепадов на всех уровнях яркости объединяются :



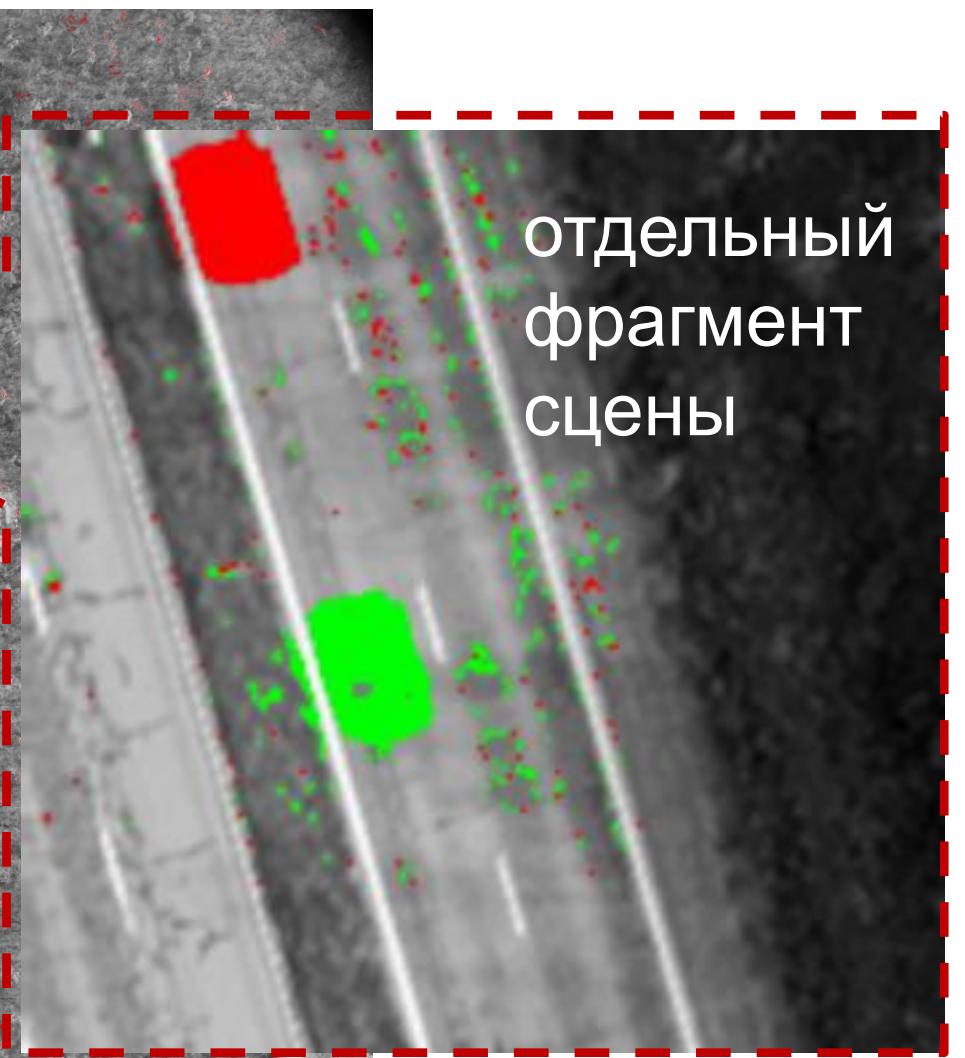
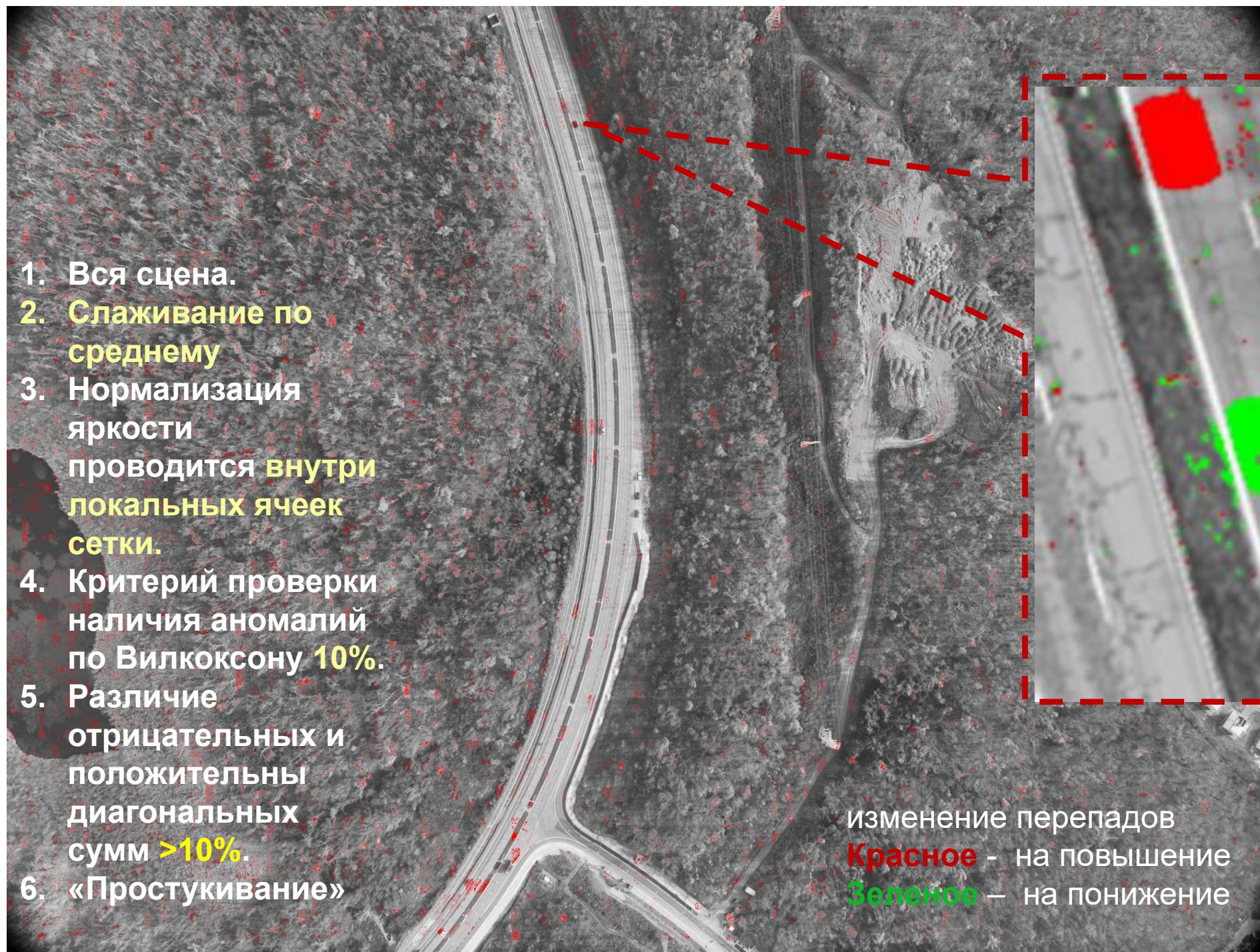
надир до
изменений

надир после
изменений

наклон до
изменений

наклон после
изменений

1. Вся сцена.
2. Сглаживание по среднему
3. Нормализация яркости проводится внутри локальных ячеек сетки.
4. Критерий проверки наличия аномалий по Вилкоксону 10%.
5. Различие отрицательных и положительных диагональных сумм $>10\%$.
6. «Простукивание»



Заключение



Усовершенствованный алгоритм МСПЯ с разложением в спектр по яркости :

Преимущества подхода:

1. **автоматически** находит **редкие мелкоразмерные изменения на текстурных изображениях,**
2. **сокращает** **область и время поиска,**
3. **минимизирует** **ложные срабатывания типа шума.**

- Результаты тестирования подхода на изображениях с российского спутника Ресурс-П (панхроматический диапазон, пространственное разрешение 0,7м) участков лесного полога в Красноармейском районе Приморского края, сделанных в августе-сентябре 2015 года, показали, что предложенный алгоритм автоматически находит редкие мелкоразмерные изменения на текстурных изображениях, кроме того, сокращает область и время поиска, а также минимизирует ложные срабатывания типа шума.
- Результаты тестирования на изображениях БПЛА (беспилотный летальный аппарат) острова Русский показали, что предложенный подход выделяет движущиеся объекты типа автомобилей на изображениях.