Развитие метода детектирования повреждений растительности природными пожарами: нейросетевая оценка качества получаемых контуров

Кашницкий А.В., Балашов И.В., Лупян Е.А.

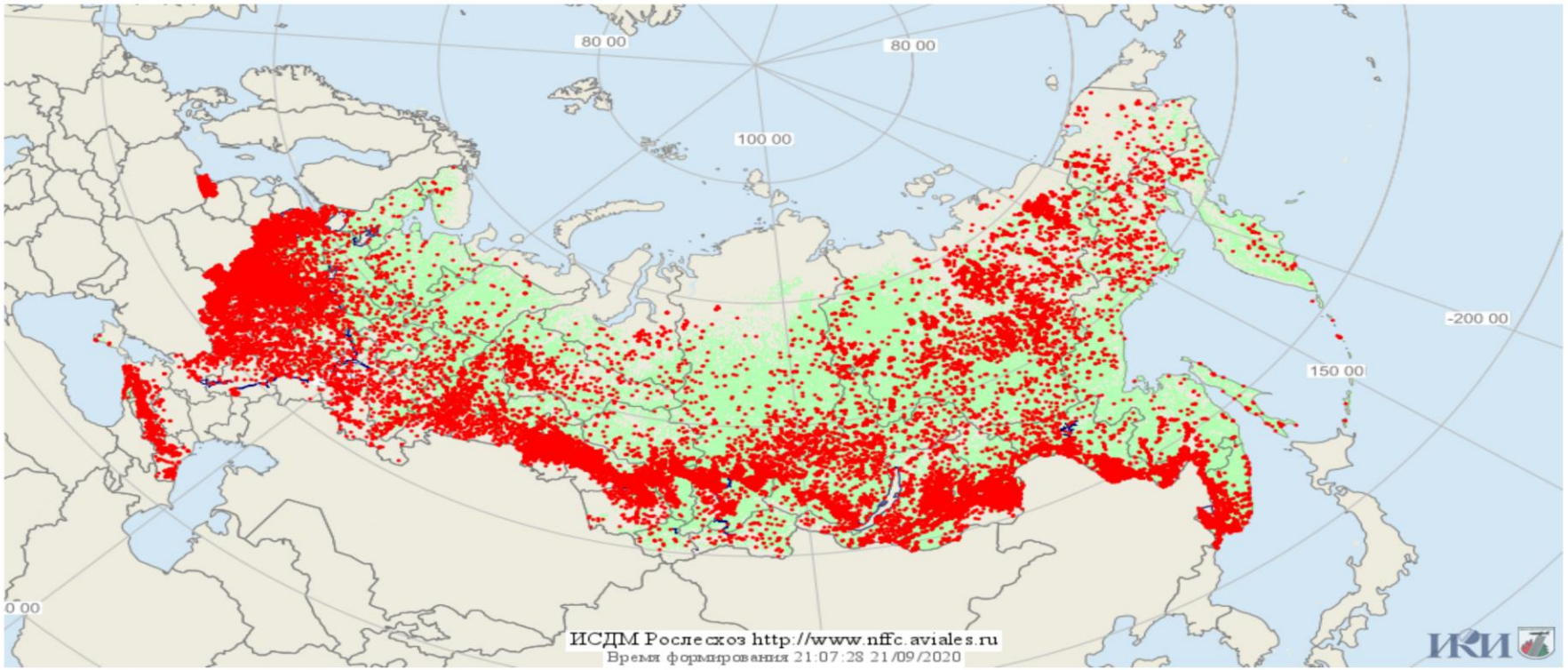
Институт космических исследований РАН

Стендовый доклад · 24-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»

Москва, ИКИ РАН, 2026 г.

Введение

Ежегодно леса России подвергаются воздействию разрушительных пожаров, общая площадь которых измеряется в миллионах гектар. В силу обширной и труднодоступной территории практически единственным способом изучения лесных пожаров и их последствий на всей территории страны является использование спутниковых данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).



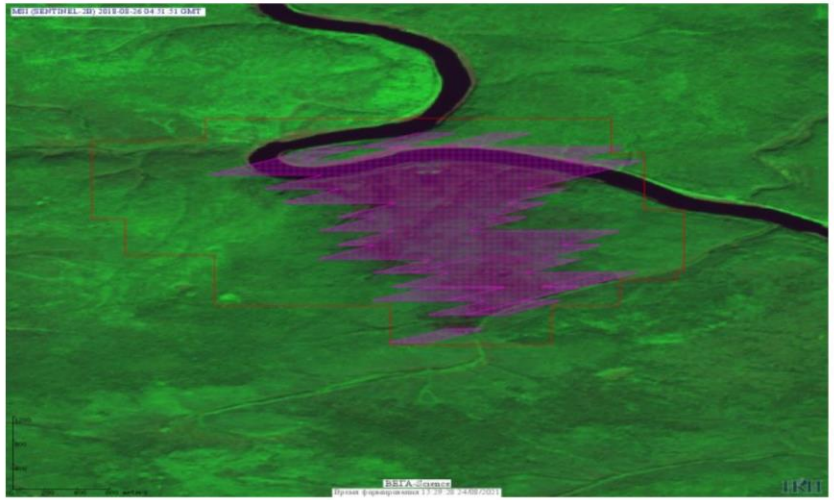
Все лесные пожары за 2019 год по данным активного горения

Введение

На данный момент оценка площадей лесных пожаров на всю территорию России выполняется по данным низкого и среднего пространственного разрешения (250-1000 м/пиксель). Такие оценки хотя и могут использоваться для анализа пожаров в масштабах регионов и страны, являются недостаточно точными и не применимы в ряде случаев, например, при анализе мелких лесных пожаров.



1



2



3

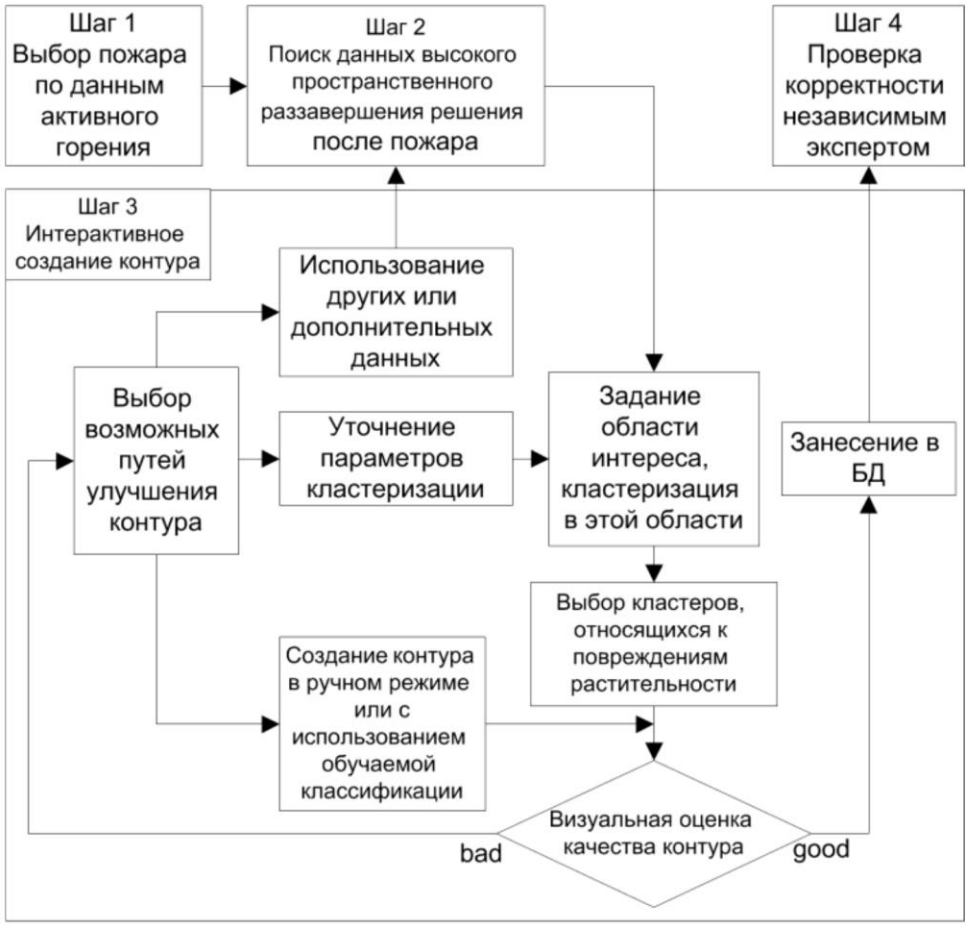
Пример контура пожара.

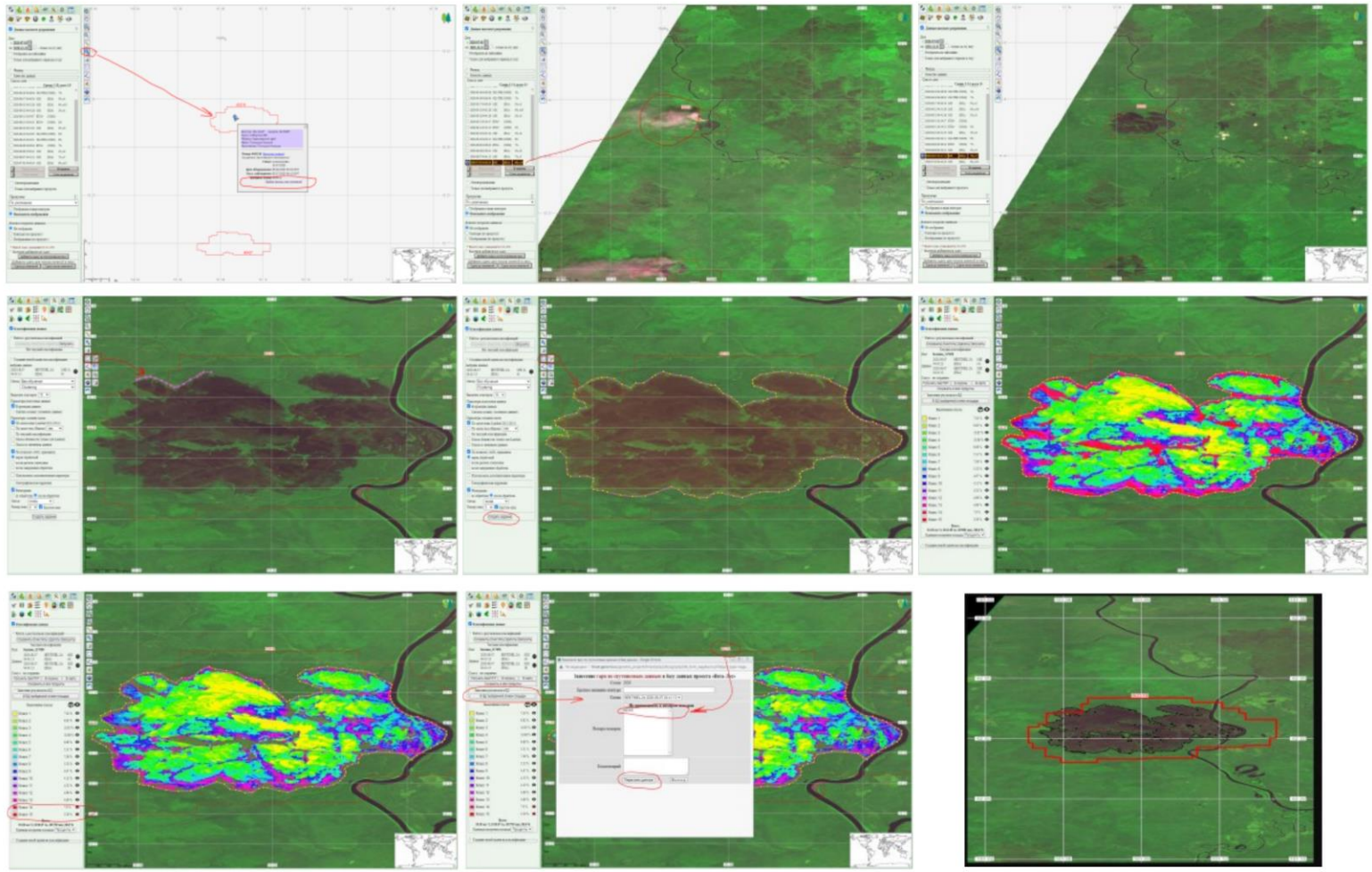
1 – по активному горению (1000 м/пиксель)

2 – на основе оценки повреждений по данным MODIS (250 м/пиксель)

3 – на основе оценки повреждений по данным MSI (10 м/пиксель)

Введение





Применяемая на данный момент схема интерактивного получения контуров гарей

Постановка задачи и путь ее решения

Необходимо разработать метод автоматического детектирования постпожарных повреждений растительного покрова на основе данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения. С его помощью должна быть возможность получения точной и независимой информации о повреждениях лесов пожарами на территории России с пространственным разрешением 10-30 метров на пиксель.

Путь решения – использовать информацию о контурах природных пожаров на основе активного горения (MODIS) как указание для дальнейшего получения серий данных в оптическом и инфракрасном диапазоне (Landsat|Sentinel-2) и автоматическое выделение по ним поврежденных огнем участков в области обнаруженного активного горения. Проведение такой процедуры предполагается для каждого обнаруженного по активному горению лесного пожара на территории России.

Постановка задачи и путь ее решения

Основные проблемы, которые не позволяли ранее перейти от обработки с участием оператора к автоматическому алгоритму:

1. Выбор пригодных для детектирования повреждений растительности безоблачных спутниковых данных. Это решено на основе создания композитных изображений за короткий период после завершения пожара и за аналогичные периоды в два года предыдущих года.

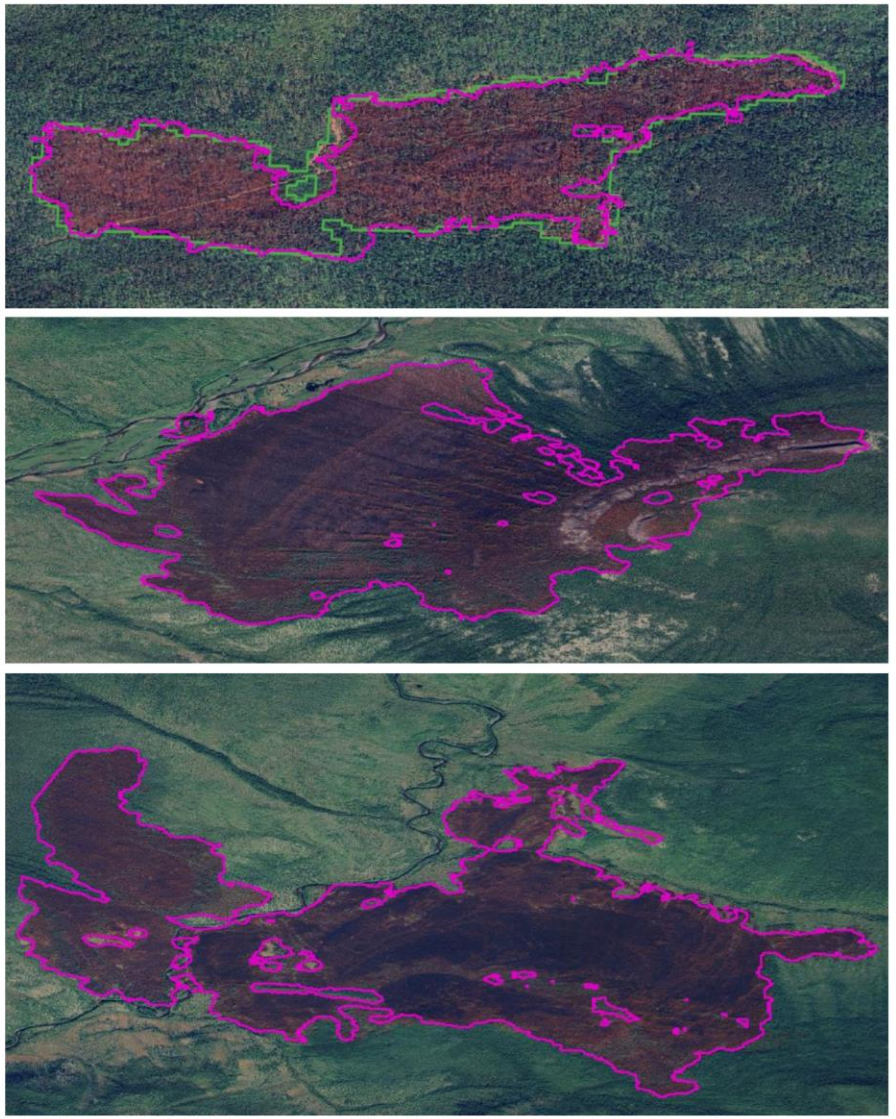
2. Выбор области, в которой необходимо искать повреждения от конкретного пожара. Это решено с помощью использования целеуказаний по данным активного горения и многоэтапного последовательного расширения области поиска последствий пожара.

3. Отделение поврежденных огнем участков от иных темных объектов, например болот или гарей предыдущих лет. Это решено на основе сопоставления информации до момента возникновения пожара и после его завершения.

Метод автоматического выделения контуров пожарных повреждений растительности. Схема алгоритма.

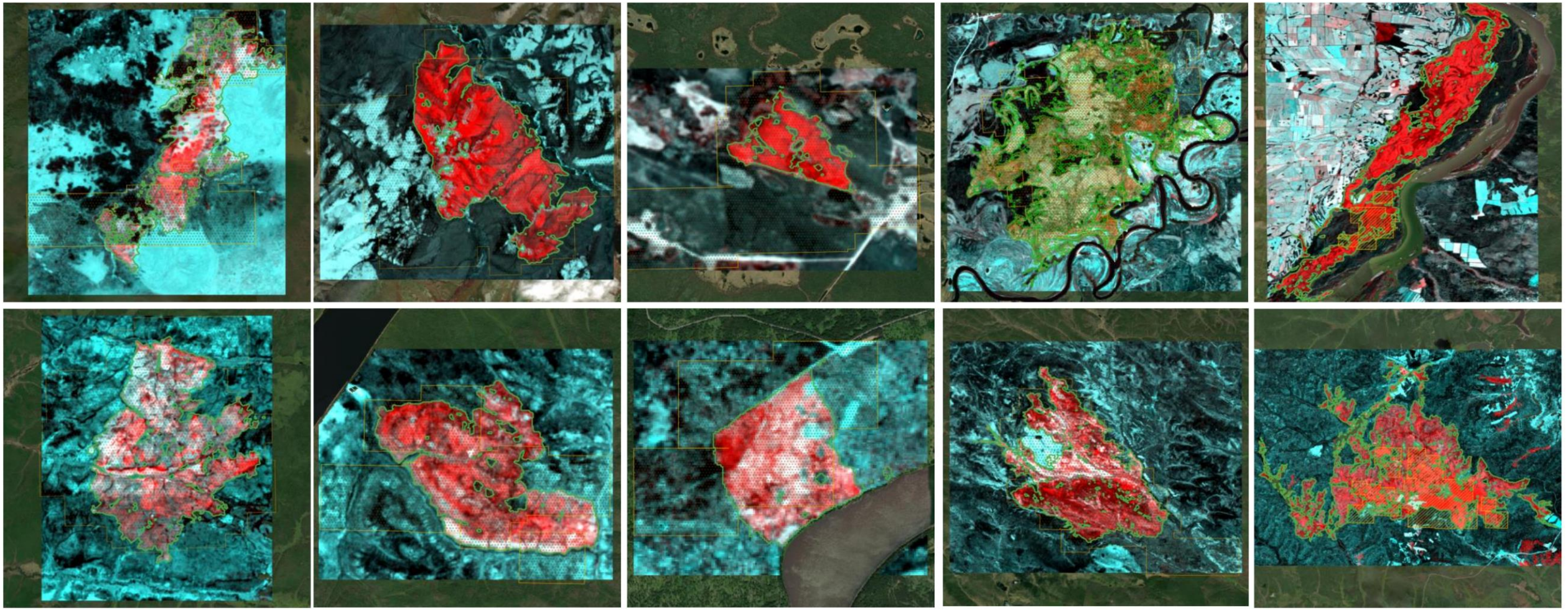


Схема метода



Примеры результатов на фоне подложки сверхвысокого разрешения. Фиолетовым – полученный автоматически. Зеленым – контур от оператора.

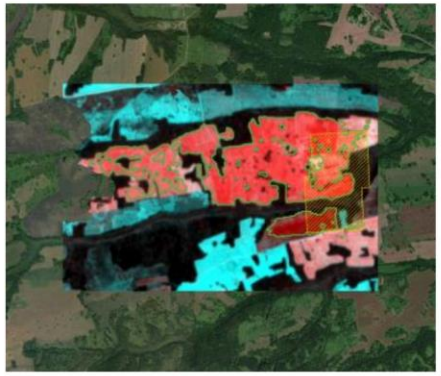
Примеры результатов

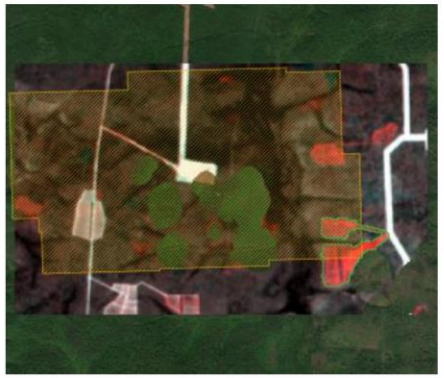


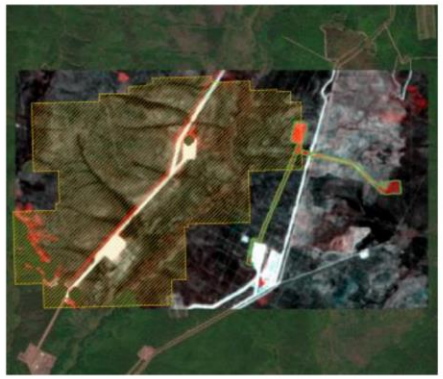
Примеры результатов детектирования контуров повреждений. Зеленым – полученные в автоматическом режиме (20м/пкс), оранжевым – по активному горению(1000м/пкс), подложка 1 – разновременной синтез (R:NBRswirAfter, G:NBRswirPrevious, B:NBRswirPrevious), подложка 2 – мозаика World Imagery

Примеры проблем

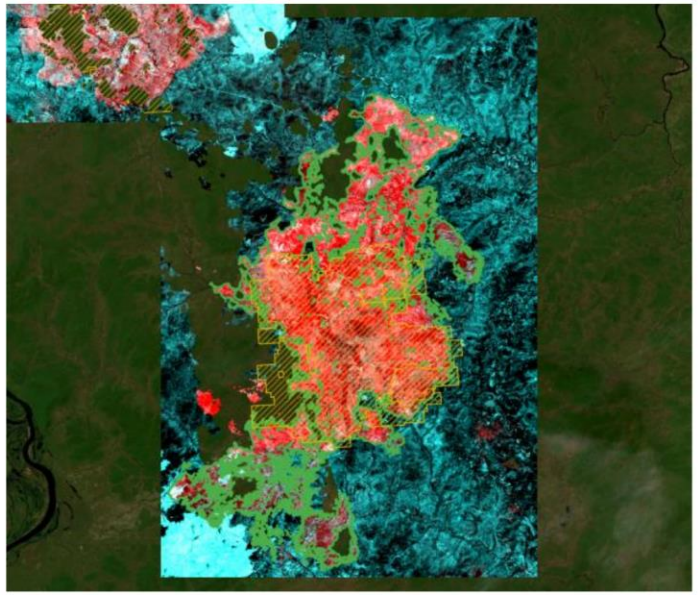
Методические проблемы с влиянием хозяйственной деятельности

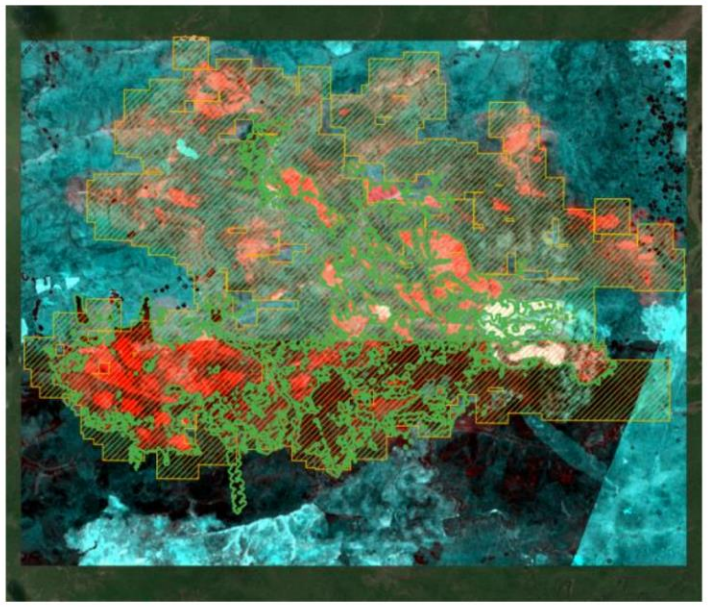




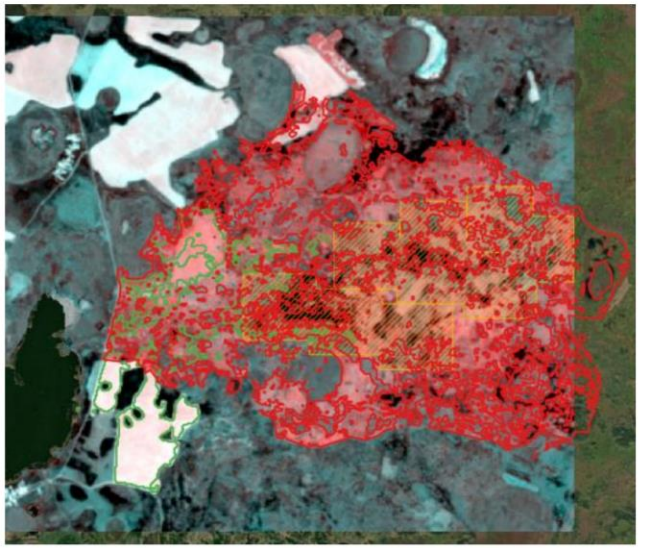


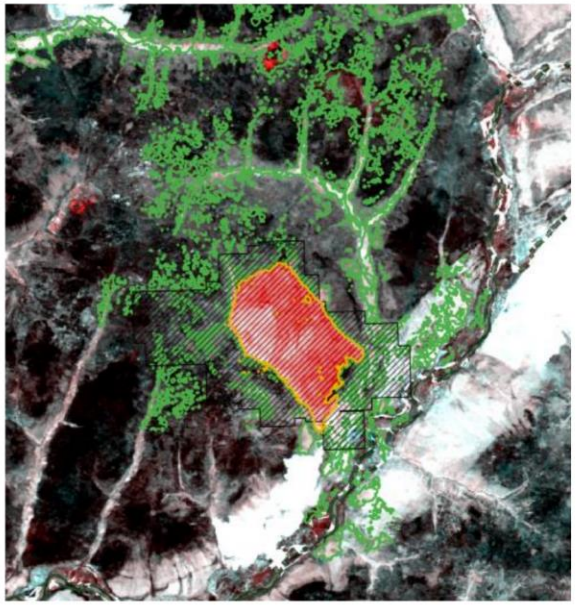
Проблемы наличия данных





Проблемы порогов или слабых повреждений





Что сделано в 2026

Оценка контура нейросетью

По изображению с контуром сеть предсказывает надёжность R (ожидаемую метрику Жаккара) и отклонение площади dA*. Эталон не нужен, оценка встроена в программу обработки.

Данные трёх серий спутников

Совместно используются Sentinel-2A/B/C MSI, Landsat 4/5 TM и Landsat 8/9 OLI.

Два режима обработки

Оперативный — по заданиям для отдельных пожаров; сезонный — для всех пожаров по окончании сезона.

Расширенная эталонная база

ИСДМ-Рослесхоз, набор для коррекции площадей пожаров и другие проекты ИКИ РАН. Около 15 % гарей привязаны к нескольким записям горения — эталон сопоставляется с «главным» пожаром.

Оценка качества результатов

Точности на полной выборке эталонных контуров из разных проектов

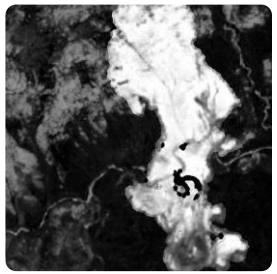
Year	Total	Good	Med	Bad	Skip	IoU	F1	|dA|	dA	|dA|ha	dAha	R_MedAE	Rmatch	Rdiv	R+	R-	A_MedAE	Amatch	Adiv
2009	4	1	1	2	7	0.491	0.702	0.265	-0.038	16.379	-0.017	0.195	2	2	2	2	0.590	1	3
2010	449	90	98	261	403	0.410	0.584	0.586	0.164	61.501	7.798	0.073	334	115	78	371	0.306	112	289
2011	1777	577	429	771	881	0.555	0.725	0.293	-0.048	71.633	-8.161	0.070	1357	420	555	1222	0.168	806	910
2012	0	0	0	0	1144	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0	0.000	0	0
2013	1316	358	257	701	1417	0.446	0.622	0.446	-0.159	117.159	-32.509	0.071	984	332	296	1020	0.217	428	762
2014	4	1	0	3	3	0.080	0.137	0.645	-0.243	452.204	-449.521	0.049	4	0	1	3	0.055	2	0
2015	423	292	72	59	94	0.795	0.886	0.124	-0.023	66.639	-7.877	0.058	356	67	282	141	0.144	219	198
2016	156	55	30	71	79	0.577	0.733	0.377	-0.208	301.095	-107.216	0.053	129	27	56	100	0.138	68	67
2017	364	216	75	73	161	0.761	0.866	0.148	0.023	58.272	3.176	0.062	286	78	217	147	0.132	201	156
2018	277	171	39	67	110	0.763	0.867	0.168	0.003	60.520	0.373	0.062	222	55	164	113	0.130	148	116
2019	820	515	111	194	71	0.778	0.876	0.161	0.053	65.086	10.983	0.060	637	183	512	308	0.099	487	297
2020	942	627	62	253	84	0.820	0.902	0.143	0.077	54.733	15.148	0.048	765	177	618	324	0.062	626	169
2021	200	142	26	32	12	0.807	0.896	0.146	0.076	199.595	43.742	0.025	194	6	147	53	0.051	158	39
2022	166	121	22	23	3	0.801	0.890	0.125	0.047	105.100	20.113	0.026	159	7	122	44	0.051	137	26
2023	393	297	32	64	9	0.821	0.903	0.142	0.079	164.280	51.235	0.025	378	15	296	97	0.059	305	76
2024	280	198	28	54	9	0.849	0.919	0.104	0.058	304.385	27.422	0.023	270	10	200	80	0.049	219	49
2025	199	132	36	31	11	0.806	0.893	0.151	0.065	48.590	14.060	0.026	190	9	136	63	0.060	156	40
Total	**7770**	**3793**	**1318**	**2659**	**4498**	**0.691**	**0.819**	**0.209**	**0.023**	**83.637**	**3.360**	**0.054**	**6267**	**1503**	**3682**	**4088**	**0.123**	**4073**	**3197**

Точности на полной выборке только лесных пожаров из ИСДМ с мая по сентябрь включительно

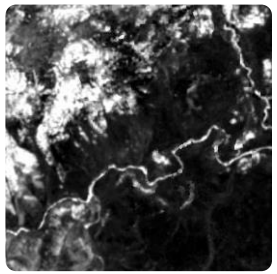
Year	Total	Good	Med	Bad	Skip	IoU	F1	|dA|	dA	|dA|ha	dAha	R_MedAE	Rmatch	Rdiv	R+	R-	A_MedAE	Amatch	Adiv
2021	101	74	18	9	5	0.818	0.903	0.149	0.114	106.355	53.905	0.025	98	3	78	23	0.061	76	25
2022	92	72	14	6	1	0.811	0.896	0.122	0.058	100.376	27.370	0.024	90	2	75	17	0.046	79	12
2023	250	215	21	14	3	0.838	0.914	0.125	0.095	124.888	74.030	0.023	241	9	214	36	0.056	198	50
2024	140	113	9	18	1	0.866	0.929	0.094	0.074	93.110	28.550	0.025	136	4	116	24	0.048	117	22
2025	114	87	18	9	4	0.827	0.906	0.136	0.096	40.780	23.670	0.022	108	6	93	21	0.066	92	21
Total	**697**	**561**	**80**	**56**	**14**	**0.838**	**0.913**	**0.121**	**0.086**	**86.600**	**41.270**	**0.023**	**673**	**24**	**576**	**121**	**0.054**	**562**	**130**

Нейросетевая оценка надёжности контура

Вход сети: 384×384 пикс., 3 канала



NBRswir после



NBRswir до



маска контура

ConvNeXt V2-Tiny
модель надёжности

→ **R** — ожидаемая метрика Жаккара

ConvNeXt V2-Tiny
модель площади

→ **dA*** — ожидаемое отклонение площади

Без эталона

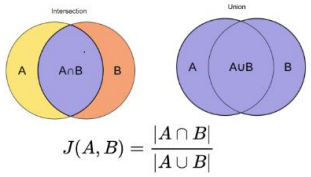
Эталон на вход не подаётся — оценка доступна для любого обработанного пожара.

Обучение

1500 гарей 2020–2025 гг.: 1200 — обучение, 150 — валидация, 150 — тест.

Выбор варианта

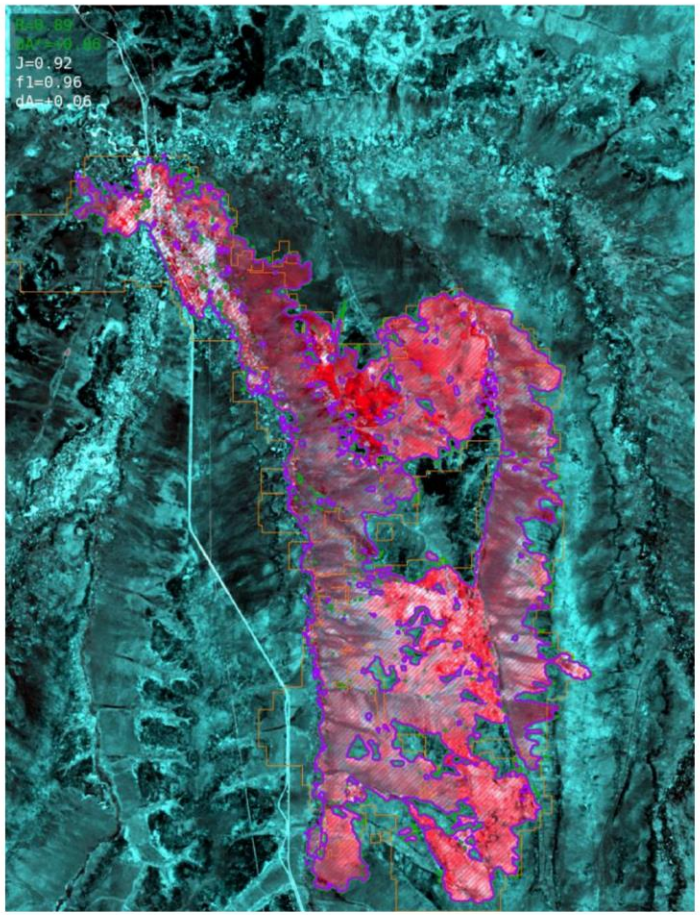
Сравнены 84 варианта входного изображения и 14 архитектур; из лучших выбрана самая быстрая.

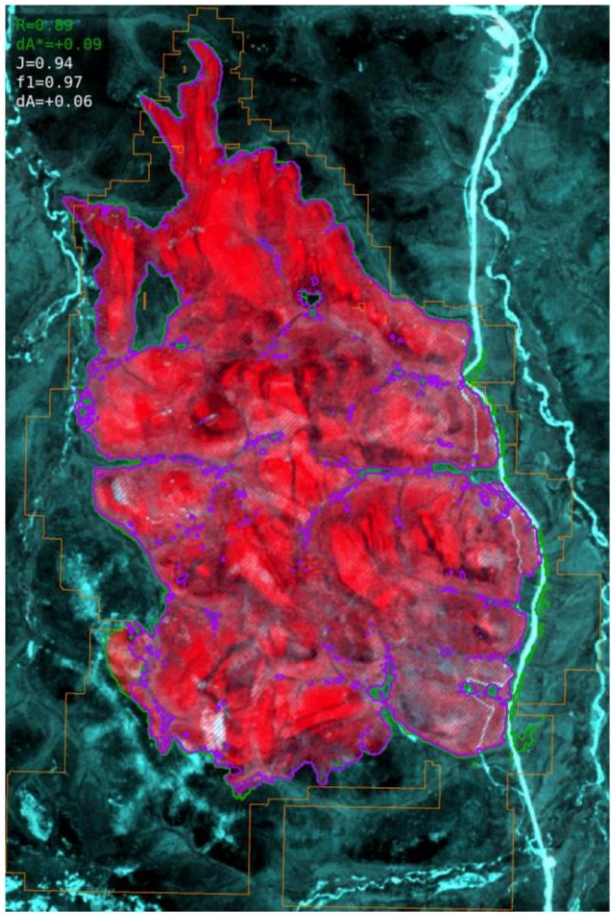


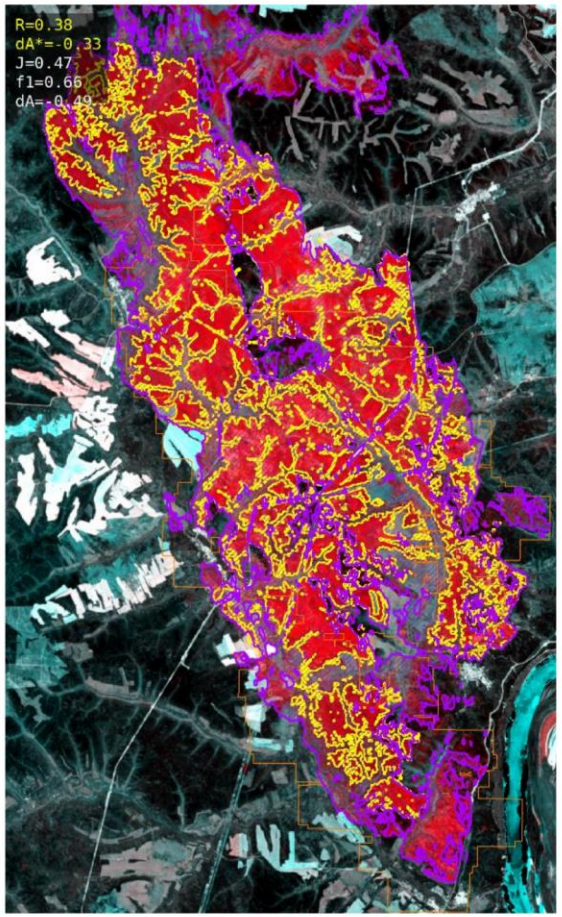
Метрика Жаккара J — отношение площади пересечения полученного контура (A) и эталона (B) к площади их объединения. R — прогноз J, dA* — прогноз отклонения площади (S − Sэт) / Sэт.

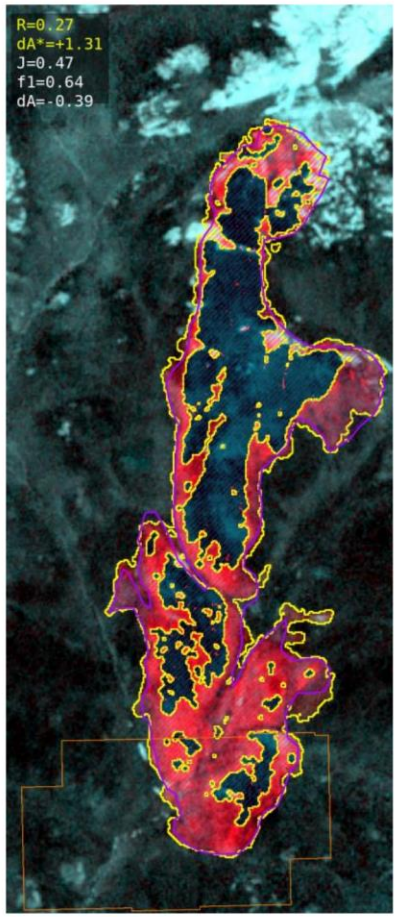
Обучение нейронной сети оценки качества результатов

На основе полученных операторами Авиалесоохраны контуров и данных других проектов были обучена нейронная сеть для оценки качества получаемого контура и оценки прогнозируемого отклонения площади









Подбор модели и варианта рендера

Эксперименты с вариантами рендера

run_id	in_chans	backbone	size	stretch_min	stretch_max	pad	val_mae
B4APmBmF__s384__mnm05_mx0__resize	4	convnext_tiny	384	-0.5	0.0	False	0.0623
B4APmBmF__s384__mnm04_mx0__resize	4	convnext_tiny	384	-0.4	0.0	False	0.0639
B3APmB_cF__s384__auto__resize	3	convnext_tiny	384	AUTO	AUTO	False	0.0646
B4APmBmF__s384__mnm04_mxm01__pad	4	convnext_tiny	384	-0.4	-0.1	True	0.0649
B4APmBmF__s384__auto__pad	4	convnext_tiny	384	AUTO	AUTO	True	0.0651
B4APmBmF__s384__mnm045_mxm01__pad	4	convnext_tiny	384	-0.45	-0.1	True	0.0654
B3APmB_cF__s384__mnm04_mx0__resize	3	convnext_tiny	384	-0.4	0.0	False	0.0659
B4APmBmF__s384__mnm04_mxm01__resize	4	convnext_tiny	384	-0.4	-0.1	False	0.066
B3APmB_cF__s1024__mnm05_mxm01__resize	3	convnext_tiny	1024	-0.5	-0.1	False	0.0664
B3APmB_cF__s384__mnm05_mx0__resize	3	convnext_tiny	384	-0.5	0.0	False	0.0666
B4APmBmF__s1024__mnm04_mxm01__resize	4	convnext_tiny	1024	-0.4	-0.1	False	0.0666
B4APmBmF__s384__mnm05_mxm01__resize	4	convnext_tiny	384	-0.5	-0.1	False	0.0667
B3APmB_cF__s384__mnm045_mx0__resize	3	convnext_tiny	384	-0.45	0.0	False	0.0668
B4APmBmF__s384__auto__resize	4	convnext_tiny	384	AUTO	AUTO	False	0.067
B4APmBmF__s1024__mnm04_mx0__resize	4	convnext_tiny	1024	-0.4	0.0	False	0.0671
B4APmBmF__s384__mnm045_mx0__resize	4	convnext_tiny	384	-0.45	0.0	False	0.0676
B4APmBmF__s384__mnm05_mxm01__pad	4	convnext_tiny	384	-0.5	-0.1	True	0.0679
B3APmB_cF__s384__mnm04_mx0__pad	3	convnext_tiny	384	-0.4	0.0	True	0.0681
B4APmBmF__s384__mnm045_mxm01__resize	4	convnext_tiny	384	-0.45	-0.1	False	0.0685
B4APmBmF__s384__mnm045_mx0__pad	4	convnext_tiny	384	-0.45	0.0	True	0.0686
B4APmBmF__s1024__mnm045_mxm01__resize	4	convnext_tiny	1024	-0.45	-0.1	False	0.0688
B4APmBmF__s384__mnm05_mx0__pad	4	convnext_tiny	384	-0.5	0.0	True	0.0688
B4APmBmF__s1024__mnm045_mxm01__pad	4	convnext_tiny	1024	-0.45	-0.1	True	0.069
B4APmBmF__s384__mnm04_mx0__pad	4	convnext_tiny	384	-0.4	0.0	True	0.069
B3APmB_cF__s384__mnm045_mx0__pad	3	convnext_tiny	384	-0.45	0.0	True	0.0691
B4APmBmF__s1024__mnm04_mx0__pad	4	convnext_tiny	1024	-0.4	0.0	True	0.0692
B3APP_cF_cB__s384__mnm045_mxm01__resize	3	convnext_tiny	384	-0.45	-0.1	False	0.0693
B3APmB_cF__s384__mnm04_mxm01__resize	3	convnext_tiny	384	-0.4	-0.1	False	0.0695
B4APmBmF__s1024__mnm045_mx0__resize	4	convnext_tiny	1024	-0.45	0.0	False	0.0698
B3APP_cF_cB__s1024__mnm04_mx0__pad	3	convnext_tiny	1024	-0.4	0.0	True	0.0701
B3APmB_cF__s1024__auto__pad	3	convnext_tiny	1024	AUTO	AUTO	True	0.0701
B3APmB_cF__s384__mnm05_mxm01__pad	3	convnext_tiny	384	-0.5	-0.1	True	0.0701
B4APmBmF__s1024__mnm05_mxm01__resize	4	convnext_tiny	1024	-0.5	-0.1	False	0.0703
B3APmB_cF__s384__mnm045_mxm01__resize	3	convnext_tiny	384	-0.45	-0.1	False	0.0705
B3APmB_cF__s1024__auto__resize	3	convnext_tiny	1024	AUTO	AUTO	False	0.0706
B4APmBmF__s1024__auto__resize	4	convnext_tiny	1024	AUTO	AUTO	False	0.0707
B3APmB_cF__s1024__mnm045_mx0__resize	3	convnext_tiny	1024	-0.45	0.0	False	0.071
B4APmBmF__s1024__mnm05_mxm01__pad	4	convnext_tiny	1024	-0.5	-0.1	True	0.071
... Total 84 experiments ...	...	...	...	...	...	...	...

всего на сетке из 84 вариантов: каналы и впечатывание контура, размер, нормализация, изменение размера или дополнение

Эксперименты с архитектурами

backbone	val_mae
convnext_tiny	0.0647
convnext_small	0.0669
efficientnet_b0	0.0796
resnet18	0.0911
resnet50	0.0925
swin_base_patch4_window12_384	0.0693
convnextv2_tiny	0.0717
tf_efficientnetv2_s	0.0767
convnextv2_base.fcmae_ft_in22k_in1k_384	0.066
vit_base_patch16_384	0.0673
maxvit_base_tf_384.in1k	0.073
vit_large_patch16_384	0.0649
swin_large_patch4_window12_384	0.0659
convnextv2_large.fcmae_ft_in22k_in1k_384	0.0692

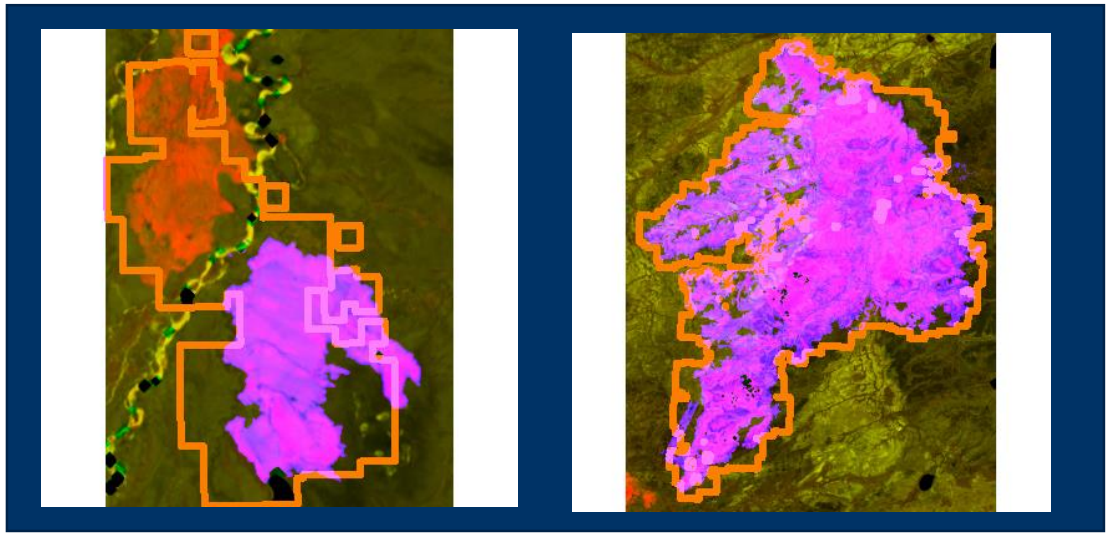
Все, что отличается менее чем на 0.015 можно считать шумом

Итог.

Выбраны следующие параметры:

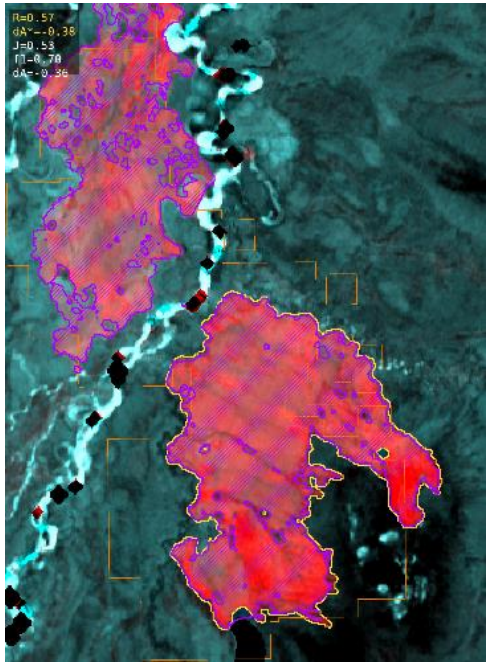
"target_metric": "jaccard",
"variant": "B3APmB_cF__s384__mnm045_mx0__resize",
"in_chans": 3,
"input_size": 384,
"stretch_min": -0.45,
"stretch_max": 0.0,
"pad": false,
"collected": 1500

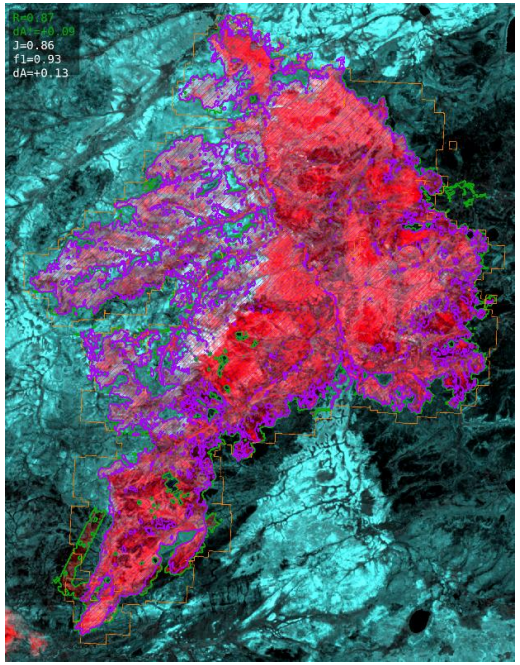
Обучение финальной модели оценки надежности (ожидаемого IoU) и оценки отклонения площади



J=0.5318, dA=-0.3613

J=0.8639, dA=0.1331





Результат финального обучения

Общее для обоих запусков: датасет 1500 эталонных гарей, модель convnextv2_tiny (384 px, растяжка [-0.45, 0.0], resize), seed 9, bs 16, lr 5e-5, AdamW, ранняя остановка (8 эпох).

Модель надёжности (target = jaccard)
• Сплит 1200 / 150 / 150 (train/val/test), остановка на эпохе 28 из 40, лучшая эпоха 20.
• val MAE = 0.0598; **test MAE = 0.0633**

Модель отклонения площади (target = area_dev)
• 34 строки без значения отброшены: 1466 гарей, сплит 1172 / 147 / 147, остановка на эпохе 24, лучшая 16.
• val MAE = 0.1333; **test MAE = 0.1095**

Итог.

Есть модели оценки надежности и отклонения площади (и что важнее - код, который их создаст по любому новому набору)

Результат на отложенном тесте (150 кадров, ни один не участвовал в обучении). Оценка надежности.

Качество сегментации

	значение	доля
средний Жаккар	0.725	
средний пиксельный f1	0.806	
хорошо, J ⩾ 0.7	**114**	76.0 %
средне, 0.5 ⩽ J < 0.7	**13**	8.7 %
плохо, J < 0.5	**23**	15.3 %
в т.ч. полный промах, J = 0	3	2.0 %

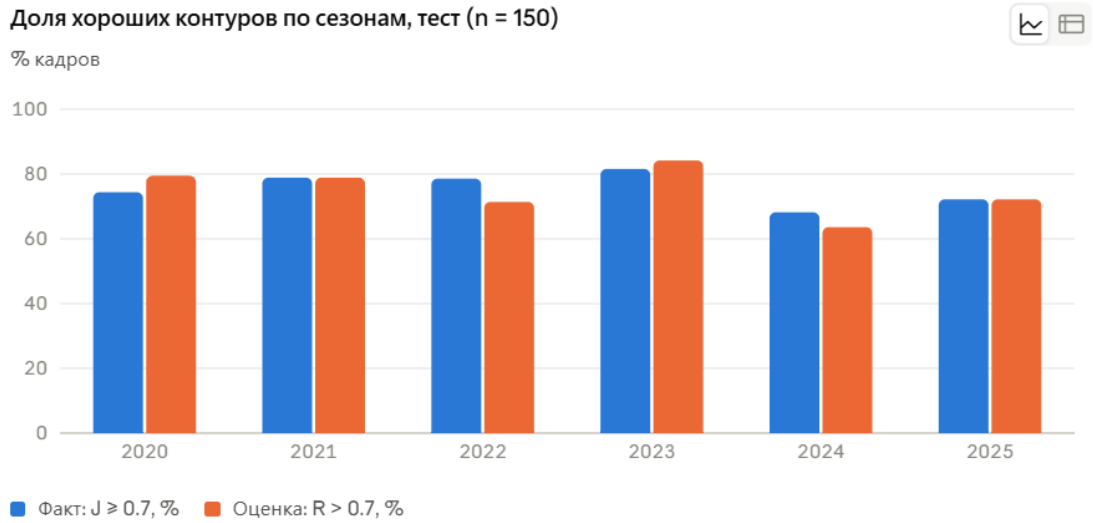
Нейросеть надёжности

	значение
R_MAE = среднее |R − J|	0.0632
|R − J| < 0.15 — оценка совпала	138 (92.0 %)
|R − J| ⩾ 0.15 — разошлась	12 (8.0 %)
R > 0.7 — предсказано «хорошо»	115
R ⩽ 0.7 — предсказано «плохо»	35
корреляция R и J	0.93

Главный результат — работа R как фильтра (порог 0.7):

	J ⩾ 0.7	J < 0.7
R > 0.7 (принято)	108	7
R ⩽ 0.7 (отбраковано)	6	29

Точность принятого решения 0.94, полнота 0.95. Средний Жаккар принятых кадров — 0.837 против 0.355 у отбракованных. Все 23 плохих кадра (J < 0.5) попали в отбраковку — среди принятых нет ни одного. Семь ошибочно принятых лежат в средней полосе 0.5 ≤ J < 0.7, то есть цена ошибки фильтра ограничена: он пропускает посредственные контуры, но не грубые промахи.



Итог. Сеть предсказывает IoU с ошибкой 0.063 и на пороге 0.7 отбраковывает все 23 плохих контура, не потеряв при этом ни одного грубого промаха в принятой части

Результат на отложенном тесте (150 кадров, ни один не участвовал в обучении). Оценка площади.

1. Метод сегментации: насколько искажена площадь

Отклонение `(pred - ref) / ref`	значение
среднее, знаковое	+0.322
медиана, знаковая	+0.077
среднее по модулю	0.533
медиана по модулю	0.124
завышение / занижение	112 / 38 кадров

Распределение по величине искажения:

|dA|	кадров	доля
⩽ 0.2	100	66.7 %
0.2 … 0.5	25	16.7 %
0.5 … 1.0	21	14.0 %
> 1.0	4	2.7 %

Ключевое: **среднее и медиана расходятся вчетверо** (+0.32 против +0.08). Если убрать четыре кадра с |dA| > 1, по оставшимся 146 знаковое среднее падает до **+0.007** при среднем модуле 0.224. То есть весь систематический сдвиг создаёт хвост из единичных грубых промахов. Искажение площади жёстко связано с качеством формы

подвыборка	n	dA знаковое	|dA|
J ⩾ 0.7	114	+0.082	0.112
J < 0.5	23	+1.597	2.703

Т.е. там, где контур верен по форме, он верен и по площади (ошибка ~11 %). Катастрофическое завышение площади — это не отдельный дефект, а тот же самый провал сегментации, только в других единицах.

Нейросеть оценки площади

Все кадры (n = 150)

	значение
A_MAE	0.395
медиана ошибки	0.069
90-й перцентиль ошибки	0.259
ошибка < 0.15 — совпало	117 (78.0 %)
ошибка ⩾ 0.15 — разошлась	33 (22.0 %)
среднее Apred / Areal	+0.023 / +0.322

Среднее в шесть раз больше медианы и втрое больше 90-го перцентиля: метрика определяется не выборкой, а несколькими кадрами. Сеть систематически недооценивает хвост — среднее Apred вдвое ниже среднего Areal при близких медианах.

Принятые фильтром, R > 0.7 (n = 115)

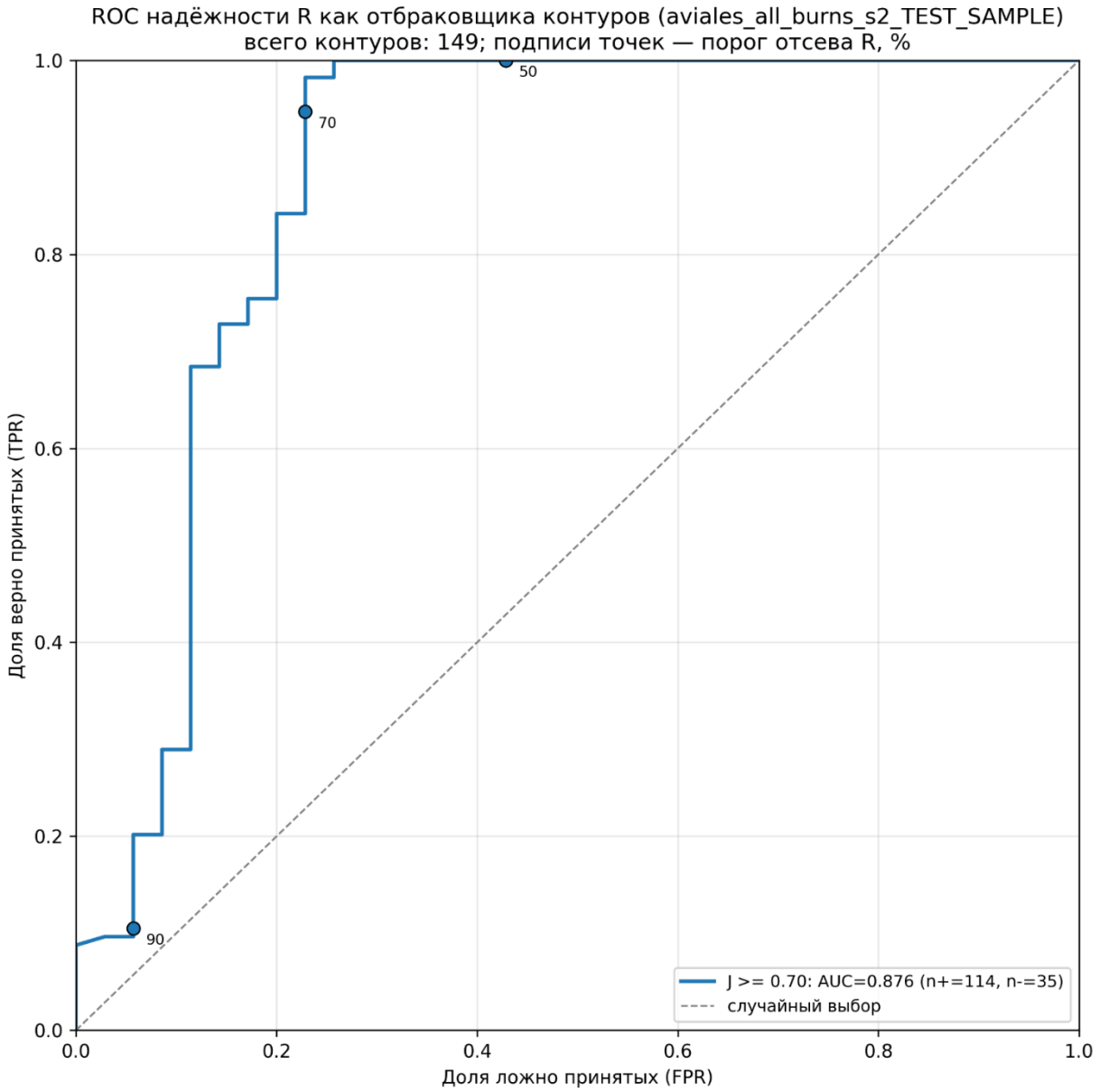
	значение
A_MAE	**0.087**
медиана ошибки	0.059
90-й перцентиль ошибки	0.169
ошибка < 0.15 — совпало	97 (84.3 %)
ошибка ⩾ 0.15 — разошлась	18 (15.7 %)
среднее Apred / Areal	+0.094 / +0.096

Рабочий режим системы: на контурах, проходящих отбраковку, искажение площади предсказывается со средней ошибкой 0.087 при медиане 0.059, смещения нет — средние Apred и Areal совпадают.

Кроме того, необходимо отметить, что разница A_MAE 0.395 -> 0.087 создаётся всего четырьмя кадрами с |Areal| > 1, и все четыре отбракованы фильтром R > 0.7. То есть сеть корректно описывает типичный случай и не воспроизводит выбросы в десятки раз.

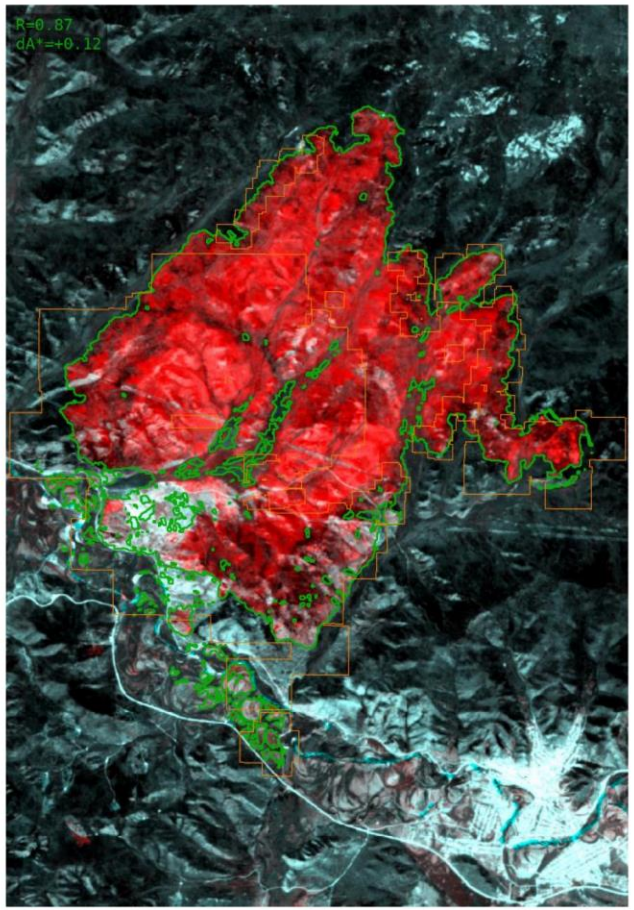
Итог. На типичной гари площадь предсказывается хорошо, хотя и хуже чем надежность, а систематическое завышение и почти вся ошибка оценки создаются хвостом из четырёх кадров с |dA| > 1, которые фильтр надёжности и без того отсекает.

ROC-кривая на тесте

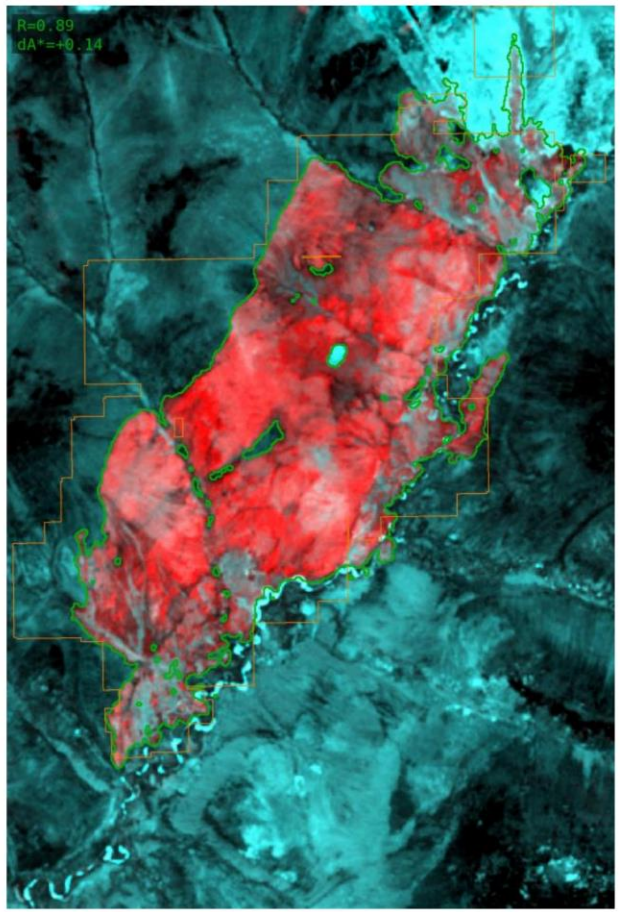


Результаты нейросетевой оценки качества полученных контуров (без эталона)

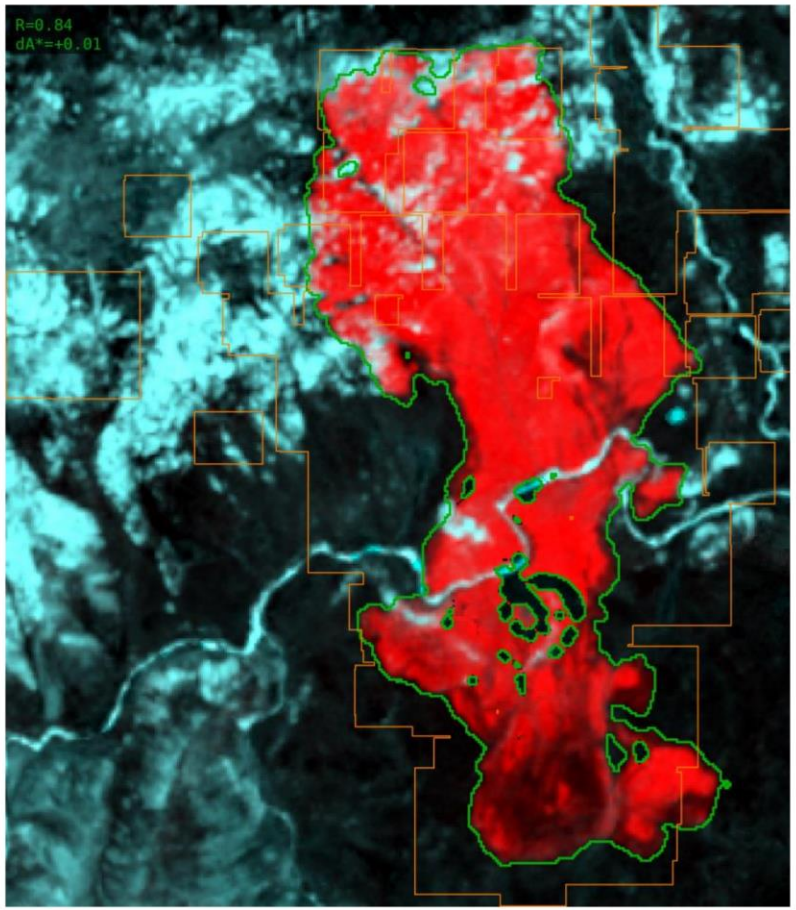
Примеры прошедших контроль качества контуров (оценка R выше 0.7)



R = 0.87
dA*=+0.12



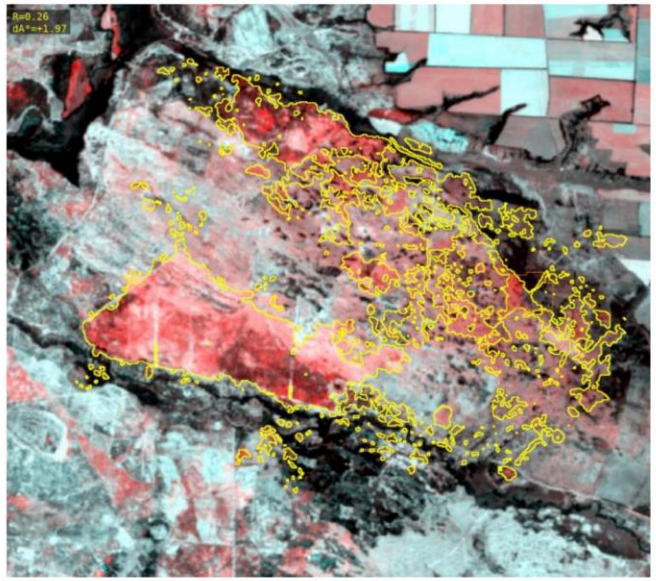
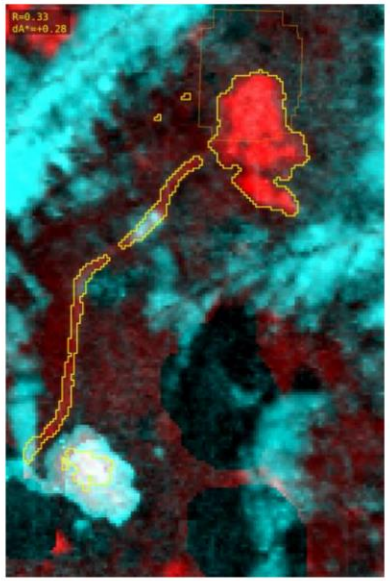
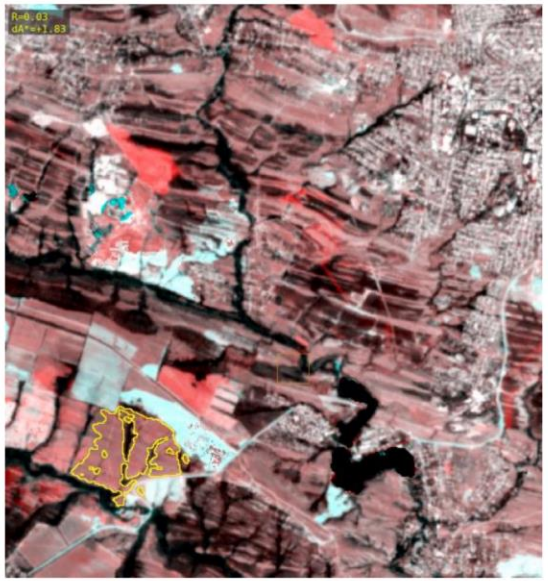
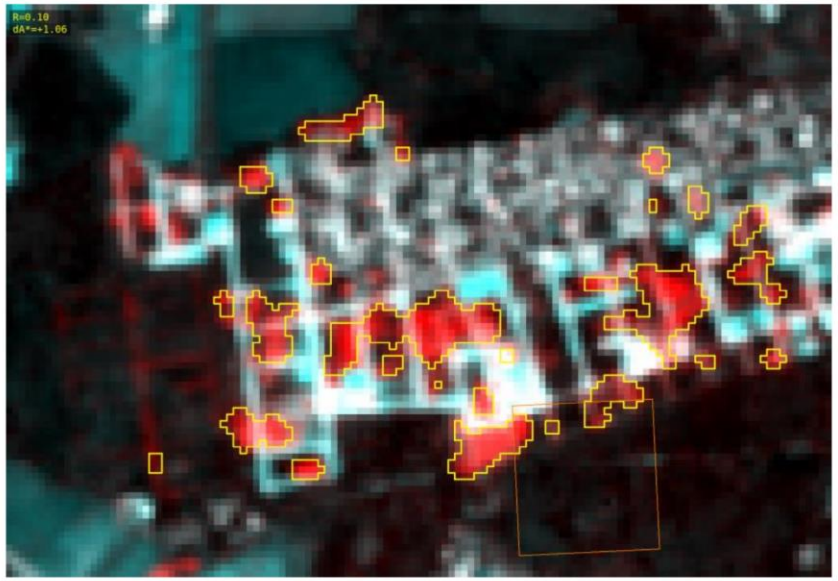
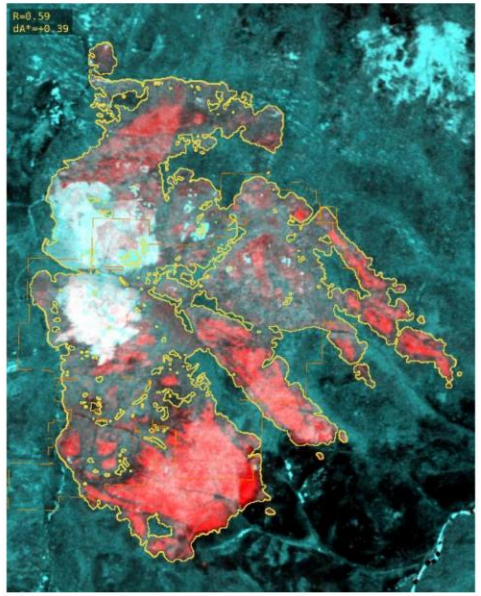
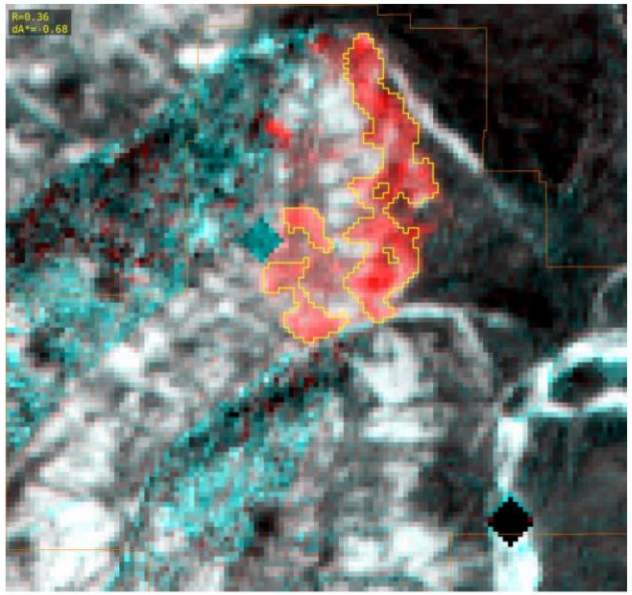
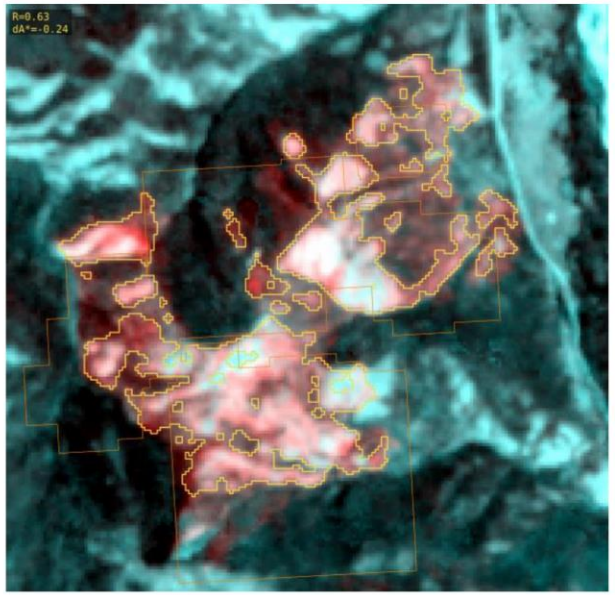
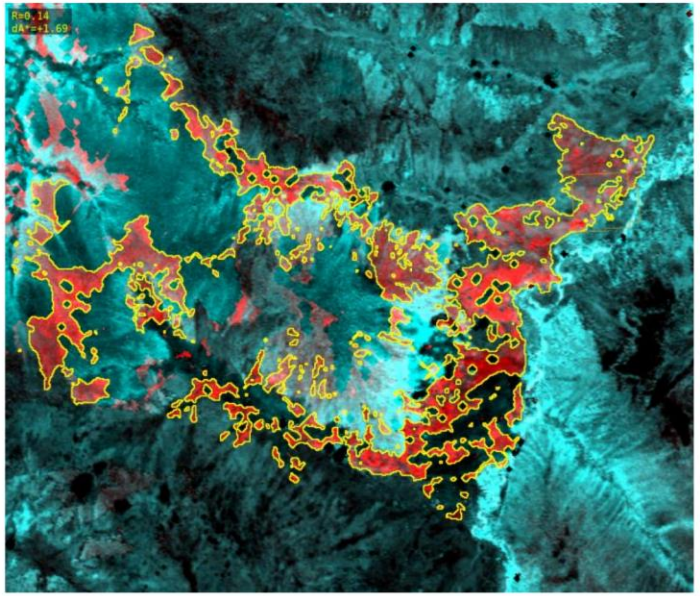
R = 0.89
dA*=+0.14



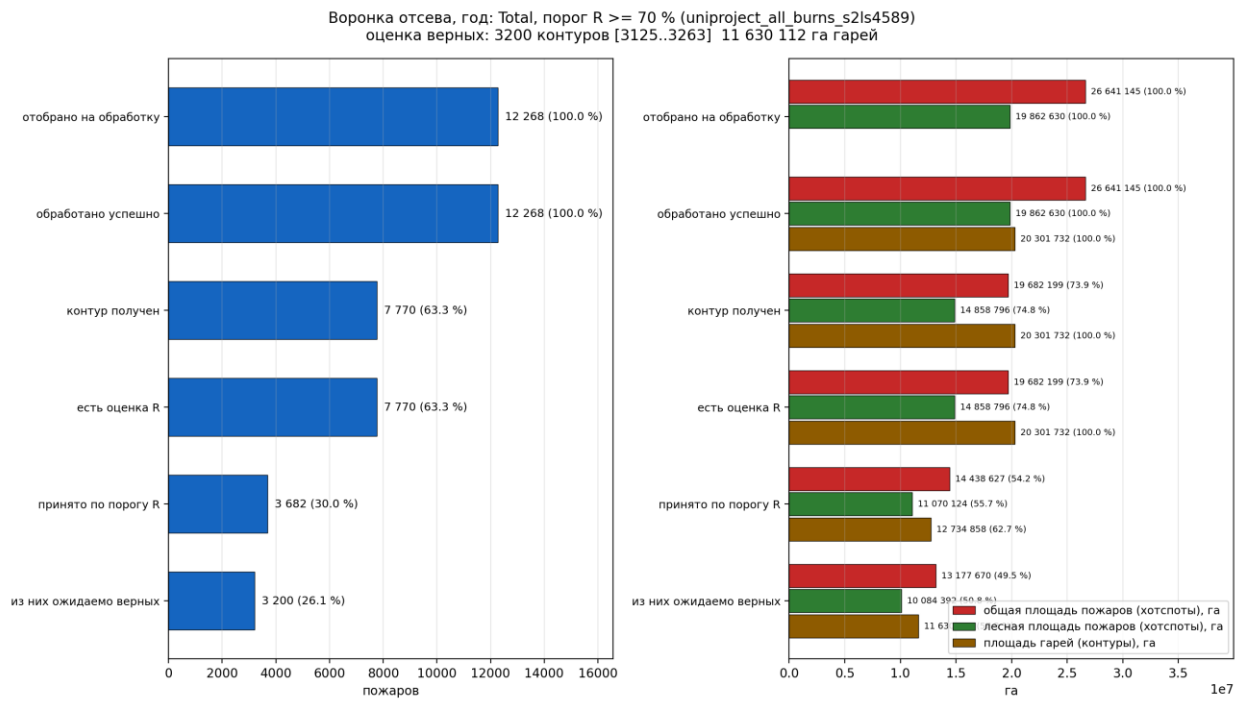
R = 0.84
dA*=+0.01

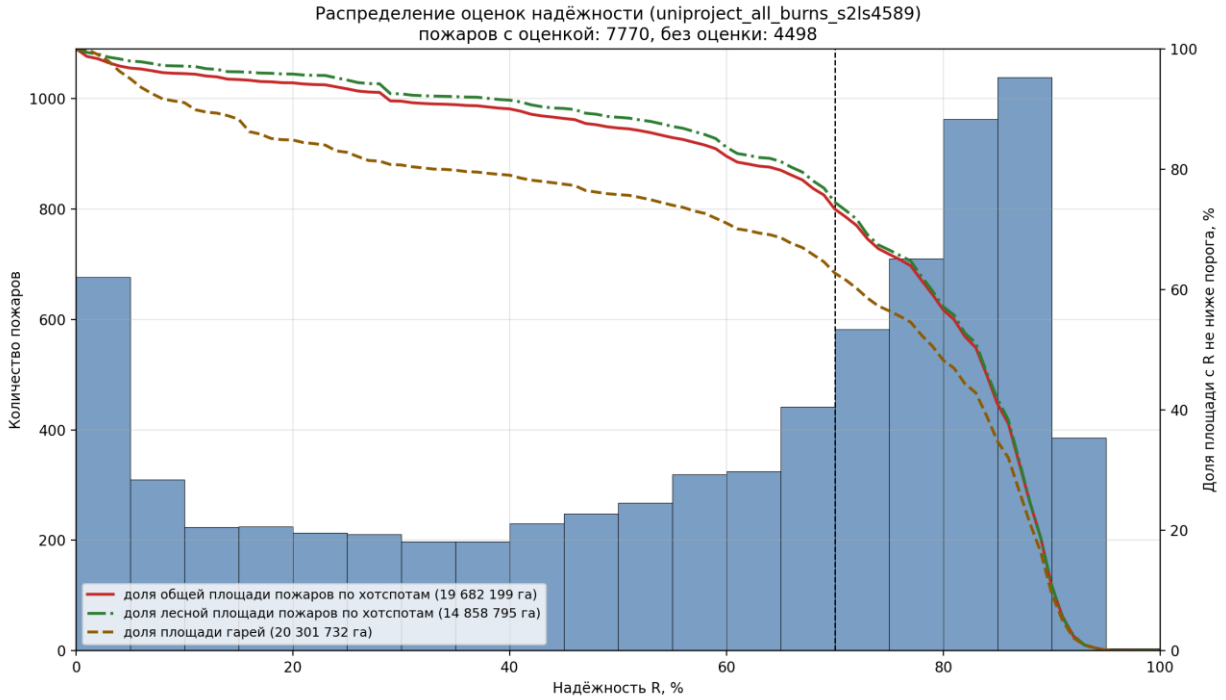
Результаты нейросетевой оценки качества полученных контуров (без эталона)

Примеры не прошедших контроль качества контуров (оценка R ниже 0.7)

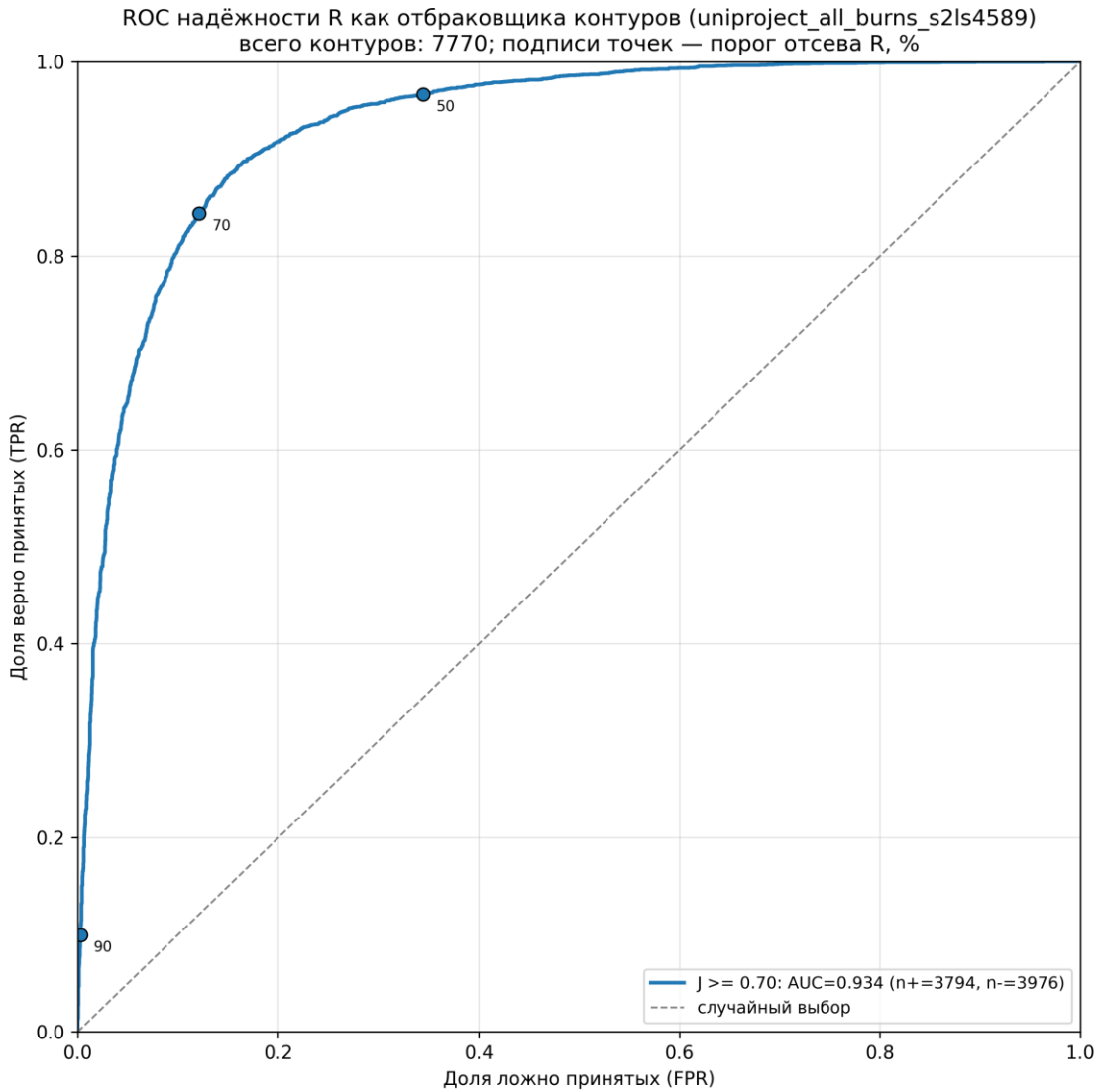
Эксперимент с обработкой всех пожаров за сезоны 2021-2026 из БД ИСДМ-Рослесхоз. Все лесные (>60 процентов от площади) пожары с фильтром на дату начала (15мая-15сентября)





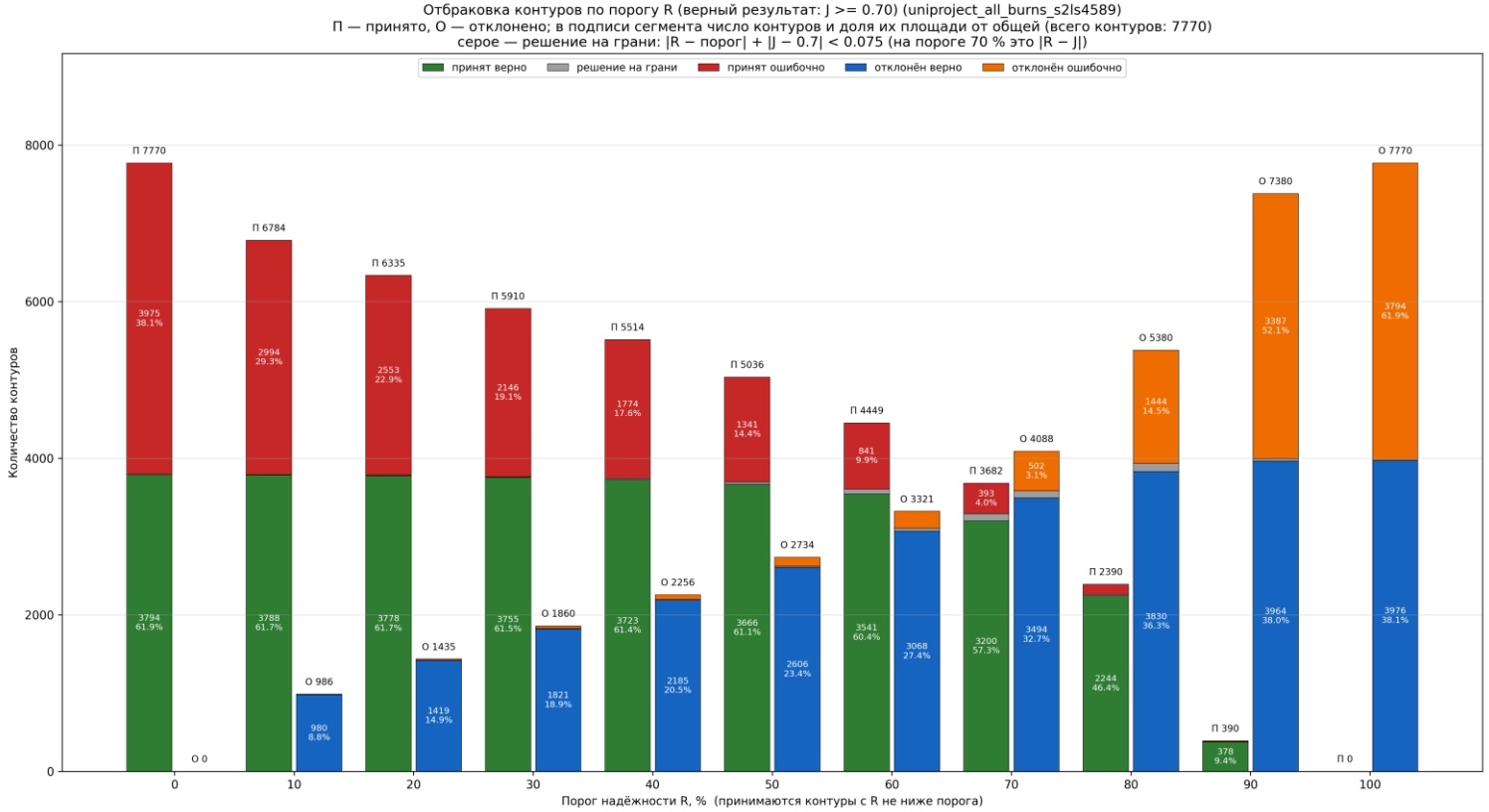
Данная расширенная “эталонная” выборка еще нуждается в чистке

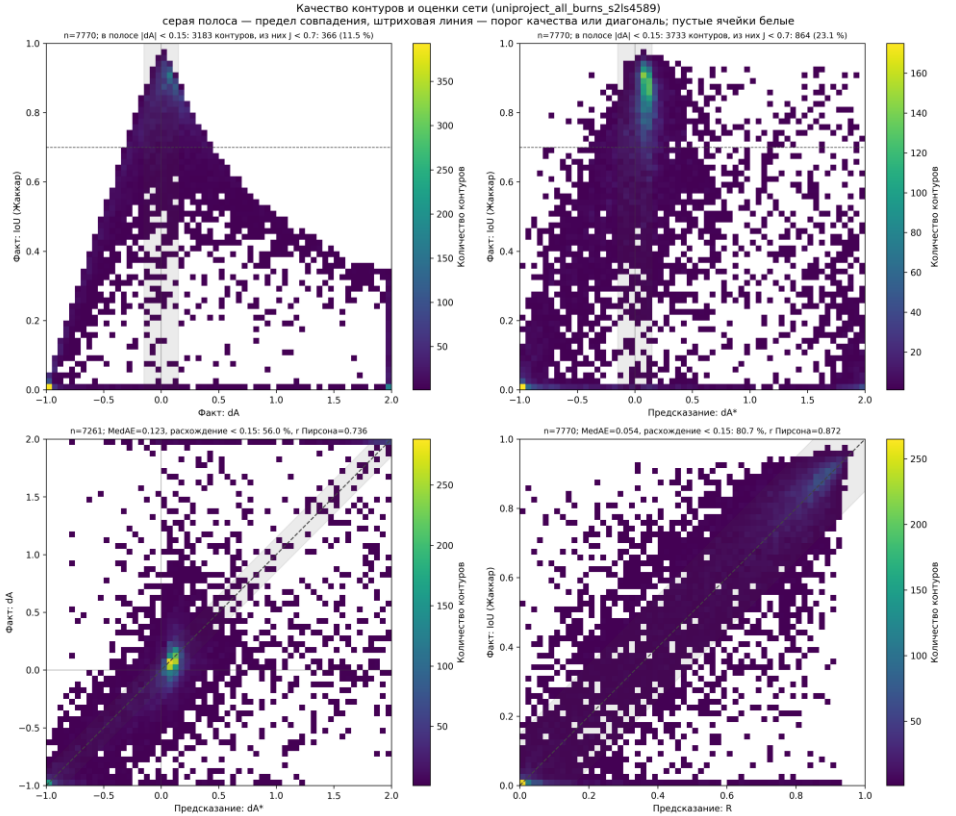
Эксперимент с обработкой всех пожаров за сезоны 2021-2026 из БД ИСДМ-Рослесхоз. Все лесные (>60 процентов от площади) пожары с фильтром на дату начала (15мая-15сентября)



Данная расширенная “эталонная” выборка еще нуждается в чистке

Эксперимент с обработкой всех пожаров за сезоны 2021-2026 из БД ИСДМ-Рослесхоз. Все лесные (>60 процентов от площади) пожары с фильтром на дату начала (15мая-15сентября)





Данная расширенная “эталонная” выборка еще нуждается в чистке

Выводы и планы

ВЫВОДЫ

- Оценка надёжности R работает как критерий качества срабатывания метода: R > 0.7 у 87 % фактических контуров с J ≥ 0.7.
- Сеть обучалась на Sentinel-2, но и для данных Landsat 2009–2019 гг. медианная ошибка R составила 0.05–0.07.
- За 2019–2025 гг. контур получен для 94 % пожаров, медиана J по годам 0.78–0.85.

ПЛАНЫ

1. Новый очищенный эталонный набор с перепривязкой пожаров
2. Переобучение на нём сети оценки надёжности
3. Доработка метода для случаев, когда данные есть, но надёжность контура низкая
4. Многолетняя карта повреждений лесов пожарами

Получение и обработка данных выполнены с помощью ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/) в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 126031818938-6).