

Выбор метода космического мониторинга депрессивной инфраструктуры Арктической зоны России с использованием искусственных нейросетей

Рихтер А.А.^(а), Гвоздев О.Г. ^(а, б), Шахраманьян М.А.^(а, в)

^(а) Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга
"АЭРОКОСМОС", г. Москва

^(б) Московский государственный университет геодезии и картографии

^(в) Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации

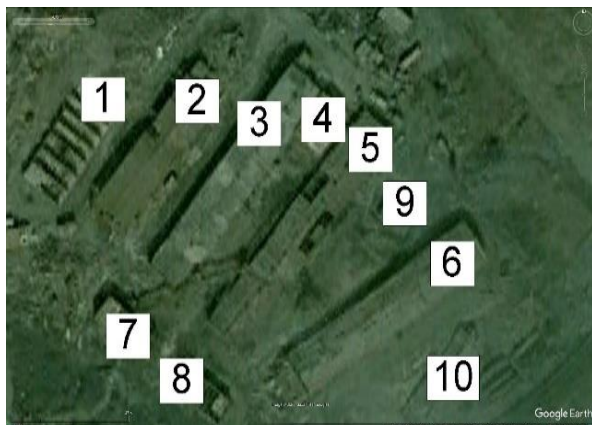
urfin17@yandex.ru

Постановка задачи

- В Арктических регионах России растут площади импактных районов, значительная часть инфраструктурных объектов находится в неудовлетворительном состоянии. Под воздействием суровых климатических условий, деградации вечной мерзлоты и логистических ограничений такие объекты постепенно приходят в негодность: становятся аварийными, забрасываются или разрушаются. Эти «депрессивные» объекты не только портят облик территорий, но и создают реальную угрозу для людей, провоцируют нерациональное использование земель и финансовых ресурсов, а также наносят ущерб окружающей среде.
- Традиционные способы обследования в арктических условиях затруднительны: они дороги, трудоёмки, небезопасны и физически не позволяют охватить обширные и удалённые территории. Поэтому остро стоит задача создания автоматизированных методов, которые позволяли бы по космическим снимкам дистанционно определять состояние строительных объектов и оценивать их геометрические характеристики.
- Для выявления депрессивных объектов и измерения их геометрических параметров предлагается применение разработанного ранее метода семантической сегментации инфраструктурных объектов, включающего трёхэтапную схему обработки спутниковых данных на базе нейросетевой архитектуры U-Net.

Деградируемые объекты инфраструктуры

Деградируемый объект инфраструктуры (сокращённо ДООИ, ранее «депрессивный строительный объект», «депрессивный объект инфраструктуры») – объект инфраструктуры (ОИ), находящийся в состоянии частичного или полного разрушения, что делает его визуально отличимым от обычных ОИ по данным ДЗЗ



Июнь 2002 г.

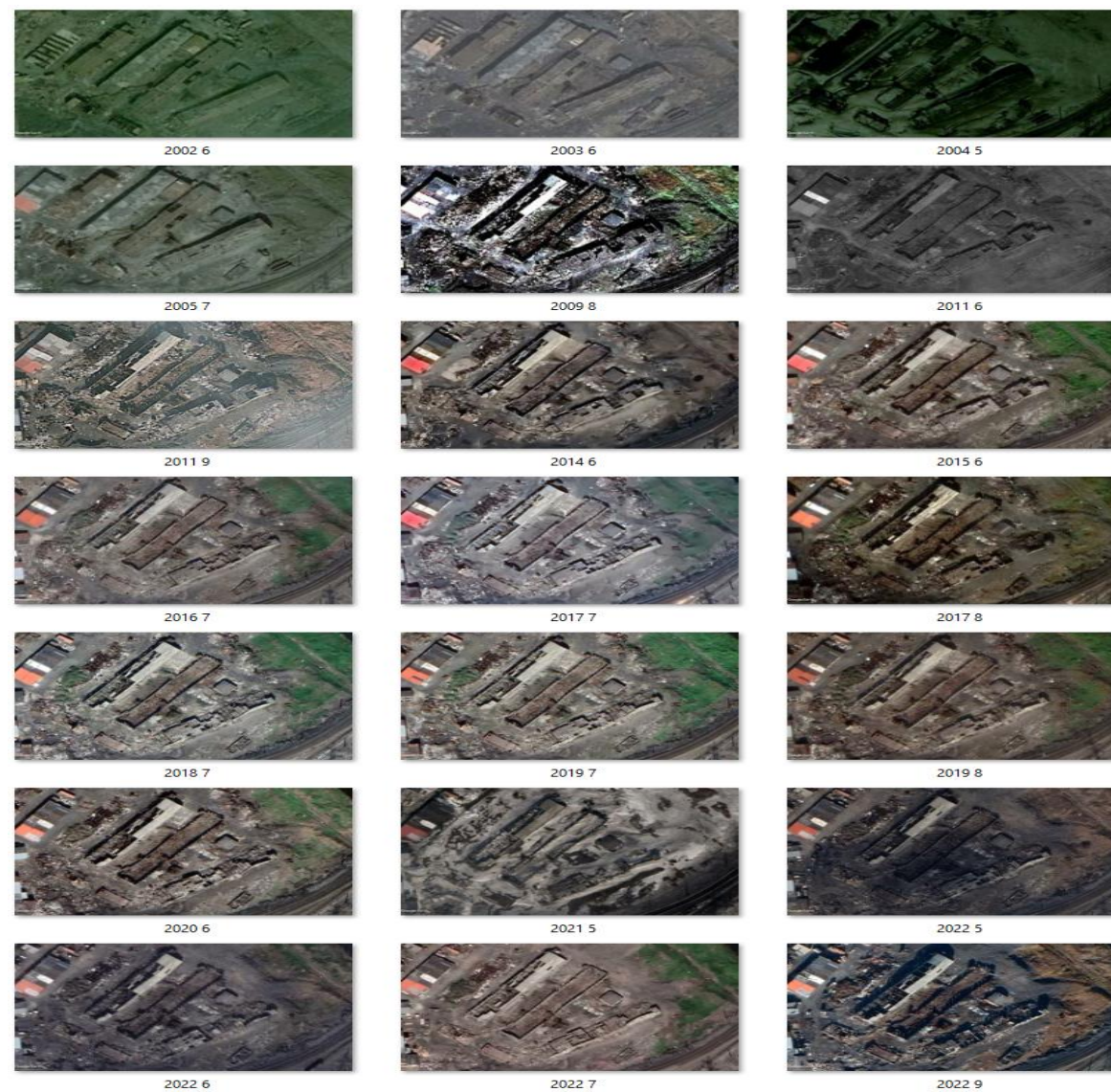


Сентябрь 2022 г.

На границах наблюдаемого периода

*Динамика деградации скопления ОИ
(скопление включает 10 ДООИ)*

г. Норильск, ул. Заводская, железнодорожное депо,
юго-восточная окраина



Раскадровка (названия кадров в формате «год месяц»)

Деструктивные факторы объектов инфраструктуры



Информативные признаки ДОО

Категория признаков	Описание
Конструктивные (признаки объектов)	Открытый строительный каркас: видны колонны, перекрытия, лестничные клетки без ограждающих конструкций; Отсутствие крыши или её незавершённость: видны внутренние помещения сверху, открытые перекрытия; Наличие строительных элементов на месте: бетонные кольца, плиты, блоки, сложенные на территории.
Контекстные (признаки окрестности объектов)	Заброшенная строительная инфраструктура: остатки бытовок, кранов (башенных или козловых), ограждений строительной площадки, бетономешалок; Частично обустроенная, но заброшенная территория: выровненные площадки, подъездные пути без покрытия, котлованы с застоявшейся водой; Отсутствие благоустройства: нет газонов, тротуарной плитки, уличного освещения, парковок.

Информативные признаки ДОО в недостроенном состоянии

Информативные признаки ДОО

Категория признаков	Описание
Конструктивные (признаки объектов)	Сгнивающие деревянные конструкции (балконы, оконные или дверные наличники, прямки и др.); Наличие искусственных укреплений; Деформирование конструкций (наличников, несущих, облицовочных); Откол отделочного покрытия, обнажение кирпича на стенах; Локальные обрушения (части стен, балконов, карнизов, пожарных лестниц); крупные трещины в несущих конструкциях.
Контекстные (признаки окрестности объектов)	Признаки эксплуатации: припаркованные автомобили, бельё на балконах, дым из труб сосуществуют с признаками разрушения; Аварийные ограждения: временные заборы вокруг опасных зон обрушения.

Информативные признаки ДОО в аварийном состоянии

Информативные признаки ДОО

Категория признаков	Описание
Конструктивные (признаки объектов, в зависимости от типа повреждения, для основных типов ЧС)	Пожары: почерневшие/обгоревшие крыши и стены, отсутствие кровли (выгорела), обрушившиеся перекрытия; Взрывы: радиальный вывал, завалы, выбитые окна в соседних зданиях; Наводнения/подтопления: следы ила, воды на территории, намытый мусор у стен, обвалившаяся от размокания штукатурка; Землетрясения, оползни: характерные Х- или Г-образные трещины, частичное или полное погружение объекта в грунт, смещение конструкции целиком.
Контекстные (признаки окрестности объектов)	Повреждения часто сосредоточены в одной части здания, соответствующей направлению воздействия; «Свежесть» разрушений: на снимках высокого разрешения видны острые края обрушений, не убранный заваленный материал, отсутствие растительности на завалах; Сопутствующие признаки ЧС: заваленные улицы, повреждённая инфраструктура вокруг (поваленные ЛЭП, разрушенные дороги).

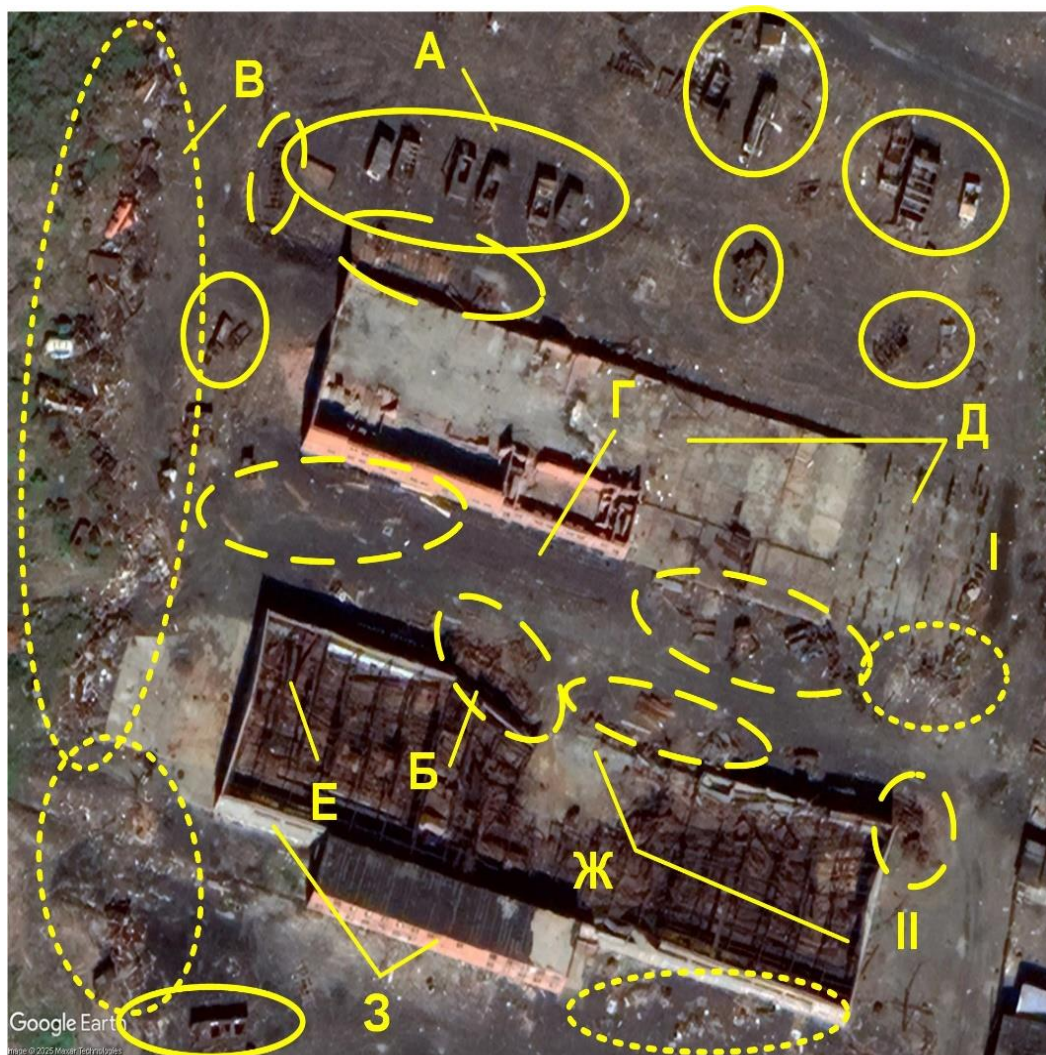
Информативные признаки ДОО в повреждённом состоянии

Информативные признаки ДОО

Категория признаков	Описание
Конструктивные (признаки объектов)	Растительность на конструкциях: деревья и кустарники, растущие на крышах, балконах, внутри через оконные проёмы; Разбитые окна и двери, открытые или глухие оконные и дверные проёмы (локально или по всему объекту); Частичное или полное обрушение крыши, обнажение внутренности объекта (помещений); Наличие надписей или изображений на стенах, крыше или полу объекта.
Контекстные (признаки окрестности объектов)	Отсутствие признаков эксплуатации: нет автомобилей, дыма из труб, света, движущихся людей, белья на балконах; Заброшенная территория: некошенная растительность на прилегающей земле, самосев деревьев на парковках и подходах; Стихийные свалки на территории объекта и в прилегающей окрестности.

Информативные признаки ДОО в заброшенном состоянии

Пример деградации территории



Собственные и контекстные информативные признаки:

А – скопления заброшенной техники и строений в окрестности

Б – скопления заброшенных строительных материалов;

В – свалки (скопления мусора);

Г – отсутствие признаков благоустройства территории (в частности, не различимы дороги, подводимые к крылу здания или проходящие вдоль его границы);

Д – видимость части фундамента здания (фундаментных блоков, армированных конструкций и др.);

Е – отсутствие крыши (частичная или полная видимость внутренности здания);

Ж – отсутствие и деформированность части стен;

З – наличие открытых оконных проёмов.

Пример ДООИ (здания I, II), составляющих часть большего скопления ДООИ (г. Норильск, северо-западная окраина)

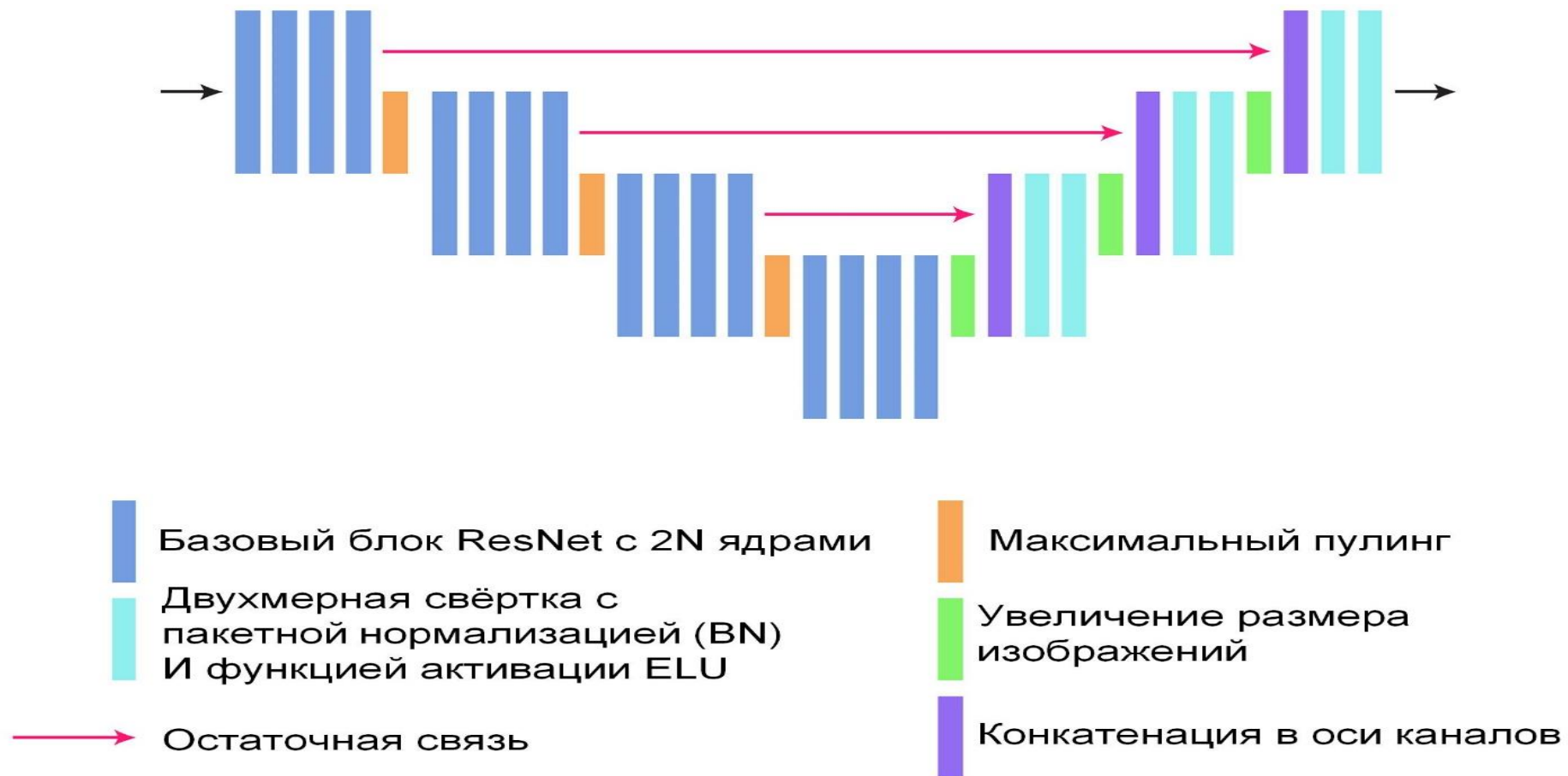
Метод выявления ДСО по данным ДЗЗ

Предлагается применение метода семантической сегментации ОИ, разработанного в [*], для выявления ДОИ и измерения их геометрических параметров. Данный метод включает трёхэтапную схему обработки спутниковых данных на базе нейросетевой архитектуры U-Net:

- подготовительный этап – сбор и разметка спутниковых снимков с учётом сезонности, освещённости и качества изображения; формирование сбалансированных обучающих наборов с помощью методов искусственного расширения данных (аугментации) для компенсации их ограниченного объёма;
- нейросетевая обработка – применение модифицированной U-Net с усиленным кодировщиком (на основе ResNet) и функцией активации ELU для сегментации объектов на уровне отдельных пикселей;
- построение трёхмерных моделей – по выделенным маскам (крыши, стены, тени зданий) и эталонным ориентирам на снимке (например, железнодорожная колея, столбы и их тени) рассчитываются масштабирующие коэффициенты, после чего восстанавливаются форма и высота объектов (зданий).

[*] Разработка фундаментальных основ и методов выявления аномальных процессов и явлений в океане, атмосфере и на суше, в том числе в Арктическом регионе по данным дистанционного зондирования Земли и моделирования / Отчет о НИР № 075-15-2020-776 от 24.09.2020. Министерство образования и науки Российской Федерации. 2022.

Схема базового блока модели ИНС



Архитектура модели интегрального анализа

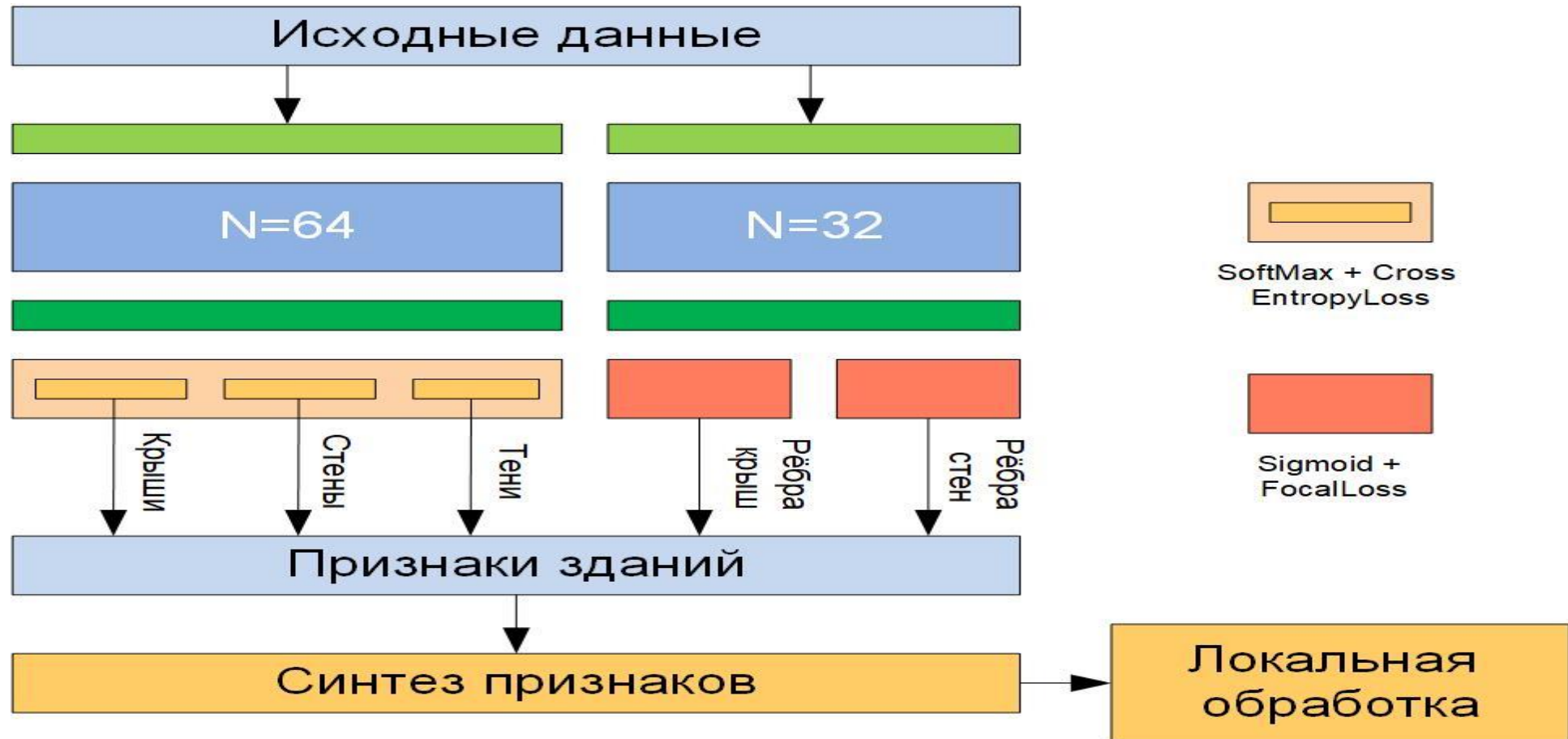
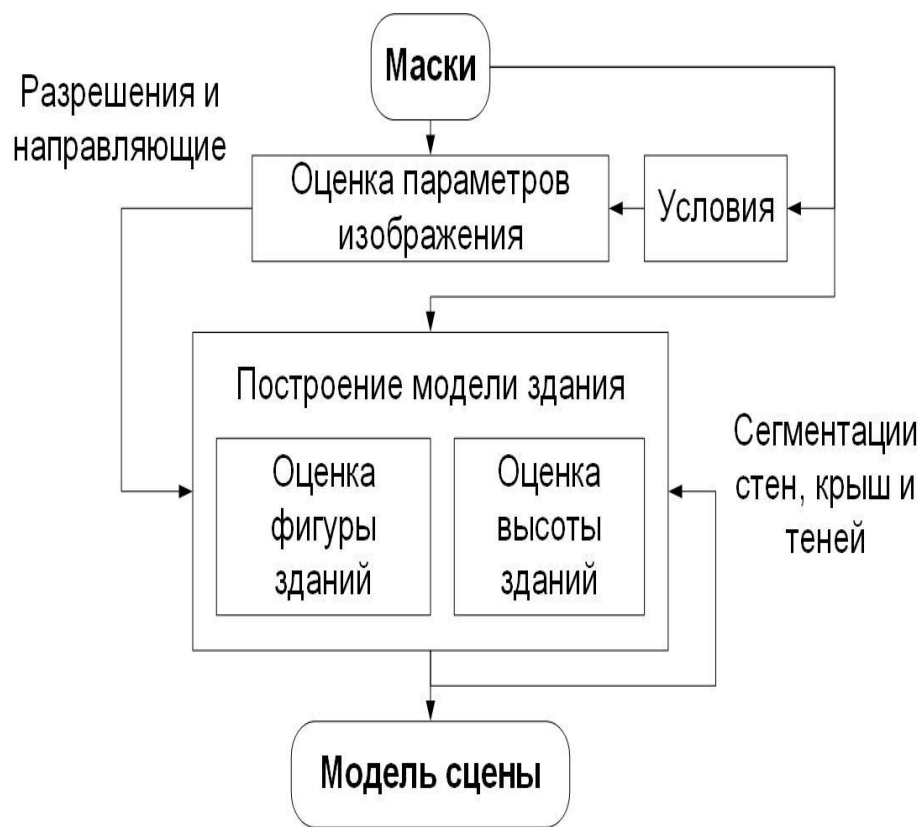


Схема построения трехмерных моделей зданий



Масштабирующие коэффициенты: $m_j = \frac{R_j}{r_j}, j = 1..q$

по направлениям $\bar{n}_j = \bar{r}_j / r_j$

r_j – отрезки, меряются координатами точек на масках

R_j – соответствующие линейные размеры отрезков

$\bar{n}_1$ и $\bar{n}_2$ – горизонтальные направляющие (рассчитываемые направления вдоль прямоугольных стен здания, для зданий с ортогональными несущими стенами);

$\bar{n}_3$ – вертикальная направляющая (рассчитываемое среднее вертикальное направление, характерное для снимка в целом);

$\bar{n}_4$ – теневая направляющая (рассчитываемое среднее направление падения тени, характерное для снимка в целом).

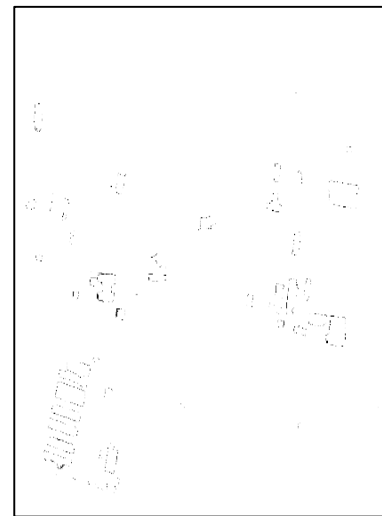
Результаты работы метода



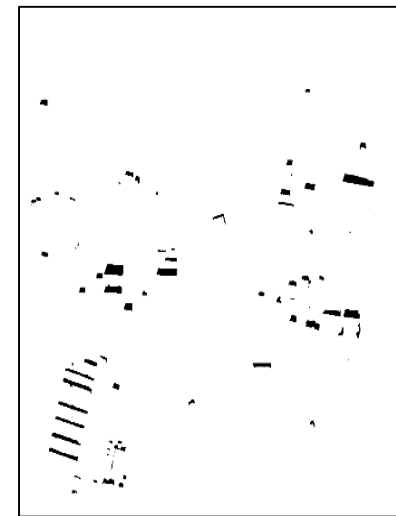
Входное изображение



Крыши



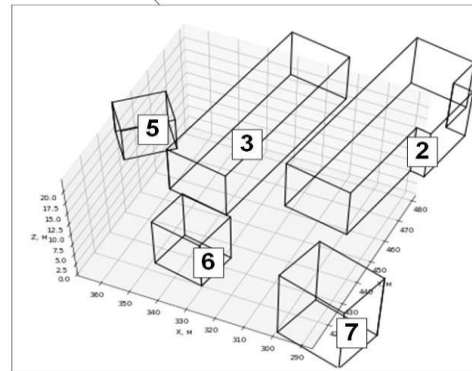
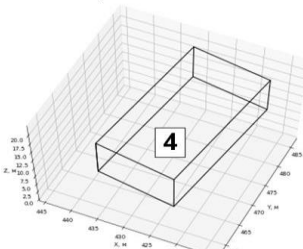
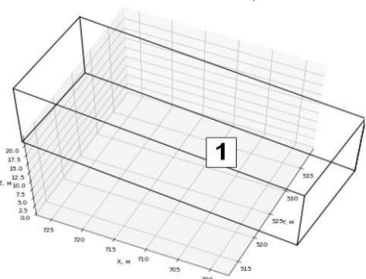
Стены



Тени

Маски сегментации классов

Оценка трёхмерных моделей зданий



на участке и

N	X_0	Y_0	α_1	α_2	P	S	H
22	531.7	708.8	175.8	85.8	125.1	691.3	15.2
24	489.6	304.6	80.2	-9.8	198.1	1713.9	10.2
26	486.2	343.3	80.5	-9.5	148.4	1138.0	9.5
38	479.9	430.4	81.2	-8.8	58.3	208.6	8.9
39	471.4	378.0	40.5	-49.5	26.8	247.4	6.8
43	428.7	337.6	169.5	79.5	28.8	274.8	10.2
44	413.3	279.0	165.1	75.1	85.4	393.5	14.8

Основные геометрические параметры зданий

X_0 и Y_0 [м] – абсцисса и ордината геометрического центра объекта;

α_1, α_2 [гр] – углы наклонов ортогональных несущих стен в горизонтальной плоскости;

P [м] – периметр объекта в основании;

S [м²] – площадь объекта в основании;

H [м] – средняя высота объекта;

N – номер объекта.

Экономический аспект проблемы выявления депрессивных строительных объектов в условиях вечной мерзлоты

Разработанный метод нейросетевой обработки спутниковых изображений для выявления депрессивных строительных объектов представляет собой цифровой интеллектуальный актив. В соответствии с классификацией цифровых активов, он относится к активам с неявно определённым режимом правового регулирования (3D-модели).

Применение при реализации региональных инвестиционных проектов

Предлагаемая технология может быть интегрирована в модели оценки и классификации региональных инвестиционных проектов, реализуемых: в рамках концессионных соглашений, с привлечением бюджетных средств.

Это позволяет:

- более точно прогнозировать состояние объектов инфраструктуры на всех этапах жизненного цикла;
- учитывать риски, связанные с деградацией конструкций (особенно в условиях таяния вечной мерзлоты);
- повышать обоснованность планируемых бюджетных расходов на реконструкцию или снос объектов;
- уточнять сметы строительно-восстановительных работ на основе актуальных данных о фактическом состоянии объектов.

Экономический аспект проблемы выявления депрессивных строительных объектов в условиях вечной мерзлоты

Импортозамещение и национальные экономические интересы

Метод является отечественной разработкой, что особенно важно в условиях западных санкций.

Инструментом достижения национальных экономических интересов с 2020 года стало импортозамещение в технологических секторах экономики. Сектор, использующий данные дистанционного зондирования Земли, относится к таким приоритетным секторам, что подтверждает стратегическую значимость разработки.

Экономические последствия пассивного отношения к проблематике ДОО

Своевременное выявление ДСО критически важно с экономической точки зрения:

- отсутствие реакции на деградацию объектов ведёт к их полному разрушению;
- разрушенные объекты трансформируются в свалки, наносящие экологический ущерб;
- свалки, в свою очередь, могут способствовать ускорению таяния вечной мерзлоты, создавая дополнительные экономические потери;
- капиталы «замораживаются» в проблемных активах, а городская среда деградирует.

Экономический аспект проблемы выявления депрессивных строительных объектов в условиях вечной мерзлоты

Формирование государственной системы учёта и контроля

Внедрение космического мониторинга в практику градостроительного управления открывает возможность создания единой государственной или муниципальной информационной системы учёта и контроля за ДСО. Это позволяет:

- перейти от реактивного устранения последствий к проактивному управлению рисками;
- системно планировать территории;
- принимать обоснованные решения о дальнейшей судьбе каждого проблемного актива — достройка, снос или реконструкция.

Таким образом, экономический эффект достигается как за счёт прямой экономии на наземных обследованиях, так и за счёт предотвращения будущих затрат, связанных с экологическим ущербом и чрезвычайными ситуациями.

Выводы

1. Предлагается метод семантической сегментации инфраструктурных объектов, находящиеся в деструктивном состоянии, и восстановления их трёхмерной геометрии. В основе метода — нейросетевая семантическая сегментация с использованием доработанной архитектуры U-Net.
2. Проведена экспериментальная проверка метода на реальных данных — спутниковом снимке района Норильска. В результате нейросетевого анализа построены маски, соответствующие крышам, стенам и теням зданий. Идентифицировано 54 объекта, для каждого из которых вычислены ключевые параметры: положение центра, ориентация стен, периметр и площадь основания, средняя высота. Получены трёхмерные модели, сопоставленные с доступными наземными фотографиями.
3. Разработанные алгоритмы могут рассматриваться как полноценный цифровой интеллектуальный актив — инструмент, полезный для планирования региональных проектов в зонах вечной мерзлоты. С его помощью можно заранее прогнозировать изменение состояния объектов, объективно оценивать риски разрушений, обосновывать бюджетные затраты на реконструкцию или ликвидацию объектов.
4. Внедрение таких технологий в практику градостроительного управления даёт возможность сформировать единую систему учёта и контроля за проблемными объектами в Арктических территориях. Это позволит перейти от пассивной фиксации аварий к активному управлению инфраструктурными рисками: своевременно принимать решения о восстановлении, сносе или консервации каждого проблемного объекта, экономя государственные средства и предотвращая экологический ущерб.