

DOI 10.31509/2658-607x-202252-115

УДК 614.842; 630*96

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДОРОГ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

© 2022 г.

Е. С. Подольская

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32*

E-mail: podols_kate@mail.ru

Поступила в редакцию: 08.10.2022

После рецензирования: 19.12.2022

Принята к печати: 20.12.2022

В статье представлен обзор развития и текущего состояния научных исследований по использованию данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса для распознавания изображения дорог в региональных лесохозяйственных проектах. Дана характеристика принципам выделения линейных объектов дорожной инфраструктуры, отмечено, что прямые дешифровочные признаки используются в таких сочетаниях, как яркостные и текстурные, геометрические и яркостные. Выделено три направления работ с примерами: визуальное дешифрирование, использование специального программного обеспечения и библиотек разработки, а также применение нейросетей. Приведено описание методов и программных средств распознавания дорожной сети, типов и пространственного разрешения необходимой космической съемки. В обзоре показано, что основой распознавания изображения дорог являются данные оптической съемки открытых и коммерческих источников, методы машинного обучения и нейросети. Актуальными задачами распознавания дорог для лесного хозяйства являются: оценка состояния покрытия дороги, моделирование расположения существующих, проектирование и строительство новых дорог; учет сезонности. Представлено описание функциональности плагина MapFlow как инструмента по распознаванию дорог для Open Source QGIS. Статья является частью разработок по региональному лесному транспортному моделированию наземного доступа к лесным пожарам и ресурсам леса.

Ключевые слова: данные ДЗЗ из космоса, дорожная сеть, распознавание объектов, лесное хозяйство, нейросеть, сверточная нейросеть, Open Source QGIS, плагины, MapFlow

Распознавание изображения дорожной сети на космических снимках ввиду сложностей сочетания характеристик геометрии и яркости является актуальной и востребованной задачей как при визуальном, так и при автоматизированном дешифрировании. Анализ научных публикаций по теме использования данных ДЗЗ из космоса в задачах распознавания дорожной сети является продолжением наших исследований по моделированию наземного перемещения пожарных и лесозаготовительных машин к лесным пожарам и ресурсам леса на региональном уровне. Технология построения маршрутов движения по дорогам разных классов, разработанная в Лаборатории мониторинга лесных экосистем Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН), позволяет получать наборы данных по маршрутам за произвольный промежуток времени, в том числе и пожароопасный период года (Подольская и др., 2020). Для корректной работы технологии необходимы актуальные данные по дорогам общего и специального доступа (лесные дороги, зимние дороги).

Существует потребность в методах и технологиях распознавания и обновления данных по сети дорог. В работах по сопоставлению данных речь часто идет об использовании снимков для определения наличия и местоположения дорог, отсутствующих в глобальных и региональных наборах данных. Основным источником

открытых данных по дорогам регионального уровня для всей территории России и мира являются векторные слои проекта Open Street Map (OSM, <https://www.openstreetmap.org/>), пример использования дан в работе (Podolskaia et al., 2020). Связям данных OSM и распознаванию объектов разной пространственной локализации (Мухаметшин, Самсонов, 2022), включая дороги, посвящены исследования, например Y. Nachmany и H. Alemohammad (2019), S. Oehmcke et al. (2019), C. Ayala et al. (2021). Для лесного транспортного моделирования наземного перемещения регионального пространственного охвата космические снимки являются практически единственным доступным материалом, который может восстановить данные и уточнить геометрию дороги, отсутствующей в базах векторных данных типа OSM.

Тема распознавания изображений объектов на снимках как гибридное направление информационных технологий и науки о данных привлекает много внимания, о чем в том числе свидетельствует обзорная работа K. Bhil et al. (2022). Инфраструктурные дорожные проекты становятся все более сложными, требуют актуальных и максимально подробных данных съемки. Данная статья посвящена одному из аспектов определения и обновления изображений дорог — распознаванию геометрии дороги по данным ДЗЗ из космоса. Отдельной темой является использование съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которая в настоящее время

активно развивается в России в техническом и правовых направлениях.

Цель статьи — представить обзор отечественных и зарубежных научных публикаций по распознаванию линейных объектов инфраструктуры дорожной сети с использованием данных ДЗЗ из космоса и выявить возможности по распознаванию дорог для проектов лесного хозяйства по транспортному моделированию. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: охарактеризовать современное состояние проблемы распознавания дорог по космическим снимкам по материалам научных статей для региональных проектов, показать особенности распознавания дорог в лесном хозяйстве и дать примеры инструментов Open Source.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОГ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Тема использования материалов ДЗЗ из космоса рассмотрена для разных видов транспорта. Дорога как часть сложного инфраструктурного объекта или проекта (дорожное строительство, нефтегазовое хозяйство) дешифрируется в обязательном тематическом окружении. Материалы съемки из космоса используются при инженерных изысканиях и проектировании железных и автомобильных дорог (Бектуров, 2015; Филатова и др., 2017; Андреева и др., 2019), определении каркаса сети до-

рог (Михеева, Федосеев, 2016). Дороги являются одним из элементов общегеографического содержания карт, распознавание которых связано с генерализацией линейного объекта на космическом снимке (Подольская, 2005). Для железных дорог в масштабе снимков от 1 : 25 000 и крупнее возможно дешифрирование двух рельс, находящихся на постоянном расстоянии друг от друга, при помощи инструментов выделения границ в системе MATLAB (Журкин, Бадышев, 2014). В работах Д. В. Долгополова и др. (2019) и Д. В. Долгополова (2020) приводятся результаты анализа дешифрирования трубопроводов и сопутствующей нефтегазовому комплексу инфраструктуры линейного протяжения.

Основным материалом идентификации дороги на региональном и локальном уровнях продолжают оставаться космические снимки разных типов. В части данных для научного исследования по тематике транспортного моделирования необходимо понимание возможностей современных и, что особенно важно, актуальных по доступу материалов съемки из космоса разного типа и разрешения. Съемка оптического диапазона некоммерческого характера (космические аппараты семейства Landsat и Sentinel-2) остается одним из основных источников анализа изображений в научных исследованиях, используется она и для распознавания дорог разных классов. Так, использованию съемки указанных источников посвящены статьи по распознаванию дорог без покрытия:

узких грунтовых дорог юго-запада Бразилии (Gomes et al., 2015) и неофициальных сельских дорог Бразильской Амазонии (Botelho et al., 2022). Сочетание оптического многозонального изображения и гиперспектра позволяет определить изменения конфигурации транспортной сети, для которых используется комбинированная технология объектно-ориентированного анализа набора снимков с использованием кластерных и контурных методов обработки (Михеева, Федосеев, 2016). Радиолокационные изображения (Henry et al., 2018; Wei et al., 2021) используются реже ввиду необходимости предварительной обработки в сравнении с оптической съемкой, которая доступнее по стоимости, но больше зависит от метеорологических условий (облачности).

Для того чтобы характеризовать современное распознавание дорог, необходимо описать принципы дешифрирования этих линейных объектов. Во-первых, дороги являются протяженными объектами с *геометрическими* (форма, размер) и *яркостными* (тон, уровень яркости, цвет, спектральный образ) признаками (Михеева, Федосеев, 2016), меняющимися на космическом изображении. Под геометрией дороги в региональных проектах обзорных масштабов понимаются ее форма и размер (ширина), каркасом геометрии сети дорог является осевая линия. Пример совместного использования геометрических и яркостных признаков дан в статье А. А. Федосеева и др. (2018). Во-вторых,

для дешифрирования также используются *структурные* признаки (текстура, структура, рисунок) и комбинации яркостных и структурных признаков, например, алгоритм спектрально-текстурной сегментации, описанный в работе И. А. Пестунова и С. А. Рылова (2012).

Косвенными признаками дешифрирования дорожной сети являются *природные*, или *ландшафтные* (показывают взаимосвязи дорог с природными объектами), *антропогенные* (выявляют функции дорог как объектов для коммуникации между населенными пунктами, расположение в социально-экономической инфраструктуре территории), а также *природно-антропогенные* (указывают на связи природных условий и транспортной освоенности).

Помимо геометрических, яркостных и структурных признаков современные исследования для построения автоматизированной модели распознавания дорог выделяют топологические (связность) и функциональные (использование) атрибуты (Botelho et al., 2022). Для дешифрирования сети дорог, как отмечает ряд отечественных авторов (Мирошниченко и др., 2013; Тусикова, Вихтенко, 2019; Игнатъев и др., 2022), необходим подбор снимков со следующими основными характеристиками: значительная длина дорог в пределах снимка, постоянная ширина дороги, равномерное распределение яркости изображения дороги в пределах снимка и четкость изображения дорожного покрытия. Таким

образом, основным этапом обработки космических снимков является сегментация спутникового изображения на тематически однородные области с последующим преобразованием в векторный формат.

Исторически распознавание дорог было начато на примере улиц населенных пунктов с появлением материалов съемки с пространственным разрешением порядка нескольких метров (Guindon, 1998). Большой обзор порядка нескольких сотен исследовательских работ по автоматическому распознаванию дорог для геоинформатики сделан в статье J. B. Mena (2003). В ней описаны основные задачи распознавания: сегментация, векторизация, оценка и оптимизация, семантические нейронные сети, а также методы и инструменты нечеткой логики. Указанная работа 2003 г. в настоящее время требует продолжения и описания актуальных методов распознавания и примеров нейросетей.

Подготовка фрагментов изображения в это время заложила основы современному распознаванию дорог на основе методов использования нейронных сетей, которые являются одним из алгоритмов классификации глубокого обучения (Deep Learning), устанавливающей веса важности различным областям и объектам на изображении и последующего итерационного распознавания. Среди нейросетей для линейных объектов дорожной сети используются свёрточные (Convolutional Neural Networks, CNN) и региональные нейронные сети (Region-Based-CNN,

RCNN). Определяющим преимуществом выбора свёрточной сети являются меньшие, в сравнении с другими алгоритмами классификации, время и вычислительные ресурсы для предварительной обработки изображений (Скрипачев и др., 2022). Лучшие результаты при семантическом сегментировании изображения для распознавания дорог в настоящее время получены при помощи полностью связанной свёрточной нейросети (Fully CNN), представляющей собой набор связанных слоев с условием, что каждый нейрон одного слоя связан с каждым нейроном другого.

Примером использования RCNN в российских публикациях служит Mask-RCNN (Тусикова, Вихтенко, 2019). Свёрточный принцип необходим для объединения значений расположенных по соседству пикселей и выделения наиболее обобщенных признаков для дороги. Ограничения качества распознавания сетей в настоящее время связаны с объемом обучающей выборки и детальностью аннотирования (предварительной сегментации) фрагментов. Отмечается, что для качественного обучения нейронной сети требуется значительный набор данных (или обучающая выборка), насчитывающий порядка тысяч изображений. Варианты могут быть найдены в готовых аннотированных наборах, среди которых только начинают появляться примеры открытого доступа. Для автоматизации распознавания используется аннотирование изображения космического снимка, состоящее в присваива-

нии подписи или метки с использованием ключевых слов. Малое количество обучающих наборов данных и недостаточность аннотирования изображения дорог на них являются ограничивающими факторами.

К отдельным задачам распознавания дорог исследователи относят выделение типа дорожного покрытия (Тормозов и др., 2020) и мониторинг технического состояния полотна дорог (Челноков и др., 2021). Ряд работ по выделению дорожного покрытия используют гиперспектральные изображения и методы машинного распознавания, отмечая потребность в данных сверхвысокого разрешения для определения степени аварийности дорог (Михеева, Федосеев, 2014; Федосеев и др., 2016; Федосеев и др., 2018). Последние работы публикуют научные результаты инфраструктурного проекта ГИС «ITS GIS» (<http://itsgis.ru/>).

Эволюция и актуальные возможности методов и технологий распознавания дорог по данным ДЗЗ из космоса представлена в табл. 1. В ней сделана группировка характерных примеров отечественных и зарубежных статей по этапам (блокам) развития распознавания дорог на космических изображениях в региональных проектах. Методически и технологически можно выделить три блока работ: визуальное дешифрирование, использование специального программного обеспечения и библиотек разработки, затем применение нейросетей. Как показывает табл. 1, произошел переход от ручного экспертного визуального дешифрирования к авто-

матизированному распознаванию нейросетями на основе экспертного опыта и обучающих наборов с высокой точностью результата порядка 80-90%. Предпосылками такого перехода стали общеизвестные возможности информационных технологий в части скорости и объема обработки данных, особенно космических, обладающих при высоком разрешении значительным объемом. К достоинствам распознавания нейросетями можно отнести скорость и доступность обработки изображений, к недостаткам — затраты времени для тщательной подготовки сегментированных изображений в качестве обучающей выборки.

Тематические примеры исследований охватывают разные регионы России и мира, основываются в своем большинстве на оптической съемке; значительная часть работ, использующих для распознавания дорог наборы данных и нейросети, представлена англоязычными статьями. В каждом блоке статьи расположены по годам публикации, что помогает показать историческое развитие методов и технологий для распознавания дорог по снимкам на основе данных разрешения порядка 1 м и лучше. Среди изученных работ в большинстве случаев в качестве библиотеки глубокого обучения используется Open Source Keras¹. Среди вариантов нейросетей, доступных в указанной библиотеке, одним из самых используемых можно назвать ResNet101 (<https://keras.io/api/applications/resnet/>).

¹ Открытая библиотека, написанная на языке Python и обеспечивающая взаимодействие с искусственными нейросетями

Таблица 1. Распознавание изображения дорог на космических снимках в проектах регионального уровня

Методы распознавания и ключевые слова	Съемочная система и пространственное разрешение	Используемое ПО/библиотека	Территория применения	Источник
Блок 1 — визуальное дешифрирование				
Визуальное распознавание автомобильных дорог различных классов и железных дорог	RapidEye (5 м)		Малообжитые районы Западной Сибири	Кобзева, 2010
Выявление дороги и мониторинг ее состояния по сезонам года по материалам ДЗЗ из космоса с уточнением полевыми исследованиями	Formosat-2, Eros A/B, Ikonos-2, QuickBird, Ресурс (1-10 м)		Архангельская область, Россия	Шошина, 2013
Блок 2 — специальное ПО и библиотеки для разработки				
Автоматическое распознавание типа покрытия дороги (битум, бетон, гравий, грунт). Сегментация дорожной сети	Spot панхром (10 м)	IMAVISION image analysis system	Канада	Maillard, Cavayas, 1989
Автоматическое извлечение дорог (поиск дорог, векторизация и присоединение отрезков дорог)	Quickbird, Ikonos, Spot, Aster, Landsat-ETM (2.4-30 м)	PCI Geomatica	Турция	Gecen, Sarp, 2008
Кластеризация гиперспектральных данных мониторинга объектов транспортной инфраструктуры	EO-1, Hyperion (30 м)	ITSGIS	Самарская область, Россия	Михеева, Федосеев, 2014
Глубокое обучение, сегментация, обнаружение дорог и инфраструктуры	Sentinel 2 (10 м)	Python (3.6), PyTorch (1.0)	Дания	Oehmcke et al., 2019
Сегментация, объектный анализ изображений, математическая морфология	Ikonos-2 (4 м)	ENVI	Италия	Barrile et al., 2020
Сегментация изображения, морфологические операции	WorldView-3 (до 0.3 м панхром, 1.24 м — мультиспектр)	MATLAB	США	Satyanarayana et al., 2020

Таблица 1. (Продолжение)

Методы распознавания и ключевые слова	Съемочная система и пространственное разрешение	Используемое ПО/библиотека	Территория применения	Источник
Блок 3 — использование нейросетей				
Глубокое обучение, семантическая сегментация, свёрточная нейронная сеть, алгоритм центральной линии, пользовательский алгоритм упрощения	WorldView-3, SkySat, Planet Dove, Sentinel-2 (1-10 м)	Сеть: U-Net based network. ПО: Keras Open Source deep learning library	Европа, Африка, Центральная Америка	Riedl et al., 2019
Полностью свёрточная нейронная сеть (FCN). Увеличение данных, деконволюция и условное случайное поле	IKonos, QuickBird, WorldView and GeoEye (порядка 1 м)	Сети: AlexNet, VGG-Net. ПО: Keras Open Source deep learning library	США	Zegeye, 2020
Сеть связности (CoANet) для совместного изучения сегментации и попарных зависимостей	SpaceNet and DeepGlobe datasets (0.3-0.5 м)	Сеть: ResNet-101 pre-trained on ImageNet	Разные регионы мира	Mei et al., 2021

2. РАСПОЗНАВАНИЕ ДОРОГ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Исследовательский опыт, представленный в табл. 1, полезен для использования при распознавании дорожной сети в лесном транспортном моделировании. Актуализация изображения лесных дорог важна в лесном хозяйстве, потому что по ним осуществляется значительная часть перемещений до автодорог с покрытием. Немногочисленны отечественные публикации по сетям лесных дорог, к ним относятся работы В. А. Орлова (2006) и К. В. Шошиной (2013). Первая статья посвящена связи атрибутивных признаков дорог с изобразительными сегментами и топологическим описанием сети. Стратегия выделения дороги определяется ее

классом. Описано порядка 15 вариантов выделения дорог с подбором соотношения свойств сегментов дороги и ее характеристик расположения в пространстве. Вторая работа описывает систему мониторинга лесовозных дорог с указанием основных признаков определения лесных дорог. Основное внимание уделено техническому состоянию лесных дорог и возможным технологиям обнаружения дефектов таких дорог в зависимости от сезона. Задачами дешифрирования дорог названы выявление факта наличия дороги, типа покрытия, оценка состояния дороги и выявление ее аварийных участков.

Из зарубежных работ отметим статью Е. Caliskan и Y. Sevim (2022), в которой даются рекомендации по использованию таких

моделей глубокого обучения для семантической сегментации лесных дорог, как нейросети ResNet-50 и InceptionResNet-V2.

К особенностям лесного хозяйства необходимо отнести сезонность использования дорог. Для моделирования наземного доступа по дорогам разных классов в лесном хозяйстве необходимы космические снимки разных периодов года, а именно: межсезонья, лета и зимы (Шошина, 2013). В каждый такой период для движения будет доступна часть дорог, зимой помимо дорог общего пользования в отдельных регионах начинают работать зимники; летом и в межсезонье часть дорог может оказаться недоступной для движения из-за состояния покрытия (Подольская, 2022). Соответственно, построенные маршруты доступа техники к ресурсам леса и лесным пожарам будут сезонно различаться.

Таким образом, к актуальным задачам распознавания дорог в лесном хозяйстве можно отнести оценку состояния их покрытия, моделирование расположения существующих и проектируемых дорог, а также учет сезонности эксплуатации дорог, определяемой по космическим снимкам.

3. ПЛАГИН MAPFLOW (OPEN SOURCE QGIS)

Практическим примером Open Source-инструмента распознавания дорог в лесных транспортных проектах может служить плагин для QGIS MapFlow. Он является одним из используемых и популярных

по данным библиотеки «открытых» инструментов для геоинформатики (<https://plugins.qgis.org/>) плагинов распознавания дорог разработки компании GeoAlert (<https://geoalert.io/>). В настоящее время в качестве исходных данных MapFlow использует материалы оптической съемки высокого пространственного разрешения. Сначала по изображению снимка готовится растровая маска дорог, затем она преобразуется в набор осевых линий дорог и векторизуется для дальнейшего использования в формат GeoJSON, также определяются тип покрытия и границы дороги (<https://geoalert.medium.com/mapflow-ai-new-roads-model-e989557cef26>). Актуальная версия плагина датируется февралем 2023 г. (<https://plugins.qgis.org/plugins/mapflow/>). Модуль появился в репозитории в июле 2021 г. и используется в работе платформы «RuMap» (<http://www.digimap.ru/products>) Научно-производственного геоинформационного центра ЗАО «Геоцентр-Консалтинг».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен обзор доступных научных публикаций по использованию данных ДЗЗ из космоса для распознавания дорог с выделением особенностей для лесного транспортного моделирования. Выявлены следующие направления исследований для использования в проектах лесного хозяйства по транспортному моделированию:

1. Справедливы общие положения для автоматизированного распознавания дорог. Дороги распознаются по снимкам открытых и коммерческих источников, по уровню пространственного разрешения используются материалы от сверхвысокодетальной съемки до съемки разрешения порядка десятков метров. Для дорог преимущественно используются прямые дешифровочные признаки, которые, в сравнении с косвенными, могут быть лучше автоматизированы. От ручного визуального дешифрирования линейных объектов дорожной сети современные исследователи за прошедшие порядка 20 лет перешли к использованию методов глубокого обучения и нейросетей. По-прежнему значительное время и технические усилия вкладываются в подготовку обучающих наборов данных для нейросети, качество которых значительно определяет результат распознавания. Таким образом, очевидным и активно развивающимся направлением исследований является использование методов и технологий искусственного интеллекта (ИИ).

2. Тематическими задачами лесного хозяйства с применением данных ДЗЗ из космоса и ИИ остаются оценка состояния дороги, выявление ее аварийности, а также проведение моделирования для проектирования и строительства новых дорог. Для распознавания и мониторинга состояния лесных дорог в регионах России в настоящее время целесообразна съемка высокой и сверхвысокой детальности,

что может быть выполнено и при помощи БПЛА. Эта технология съемки представляет значительный интерес ввиду высокого пространственного разрешения (сантиметры), возможности оперативной организации съемочных работ и наличия доступных программных средств обработки.

В качестве положительных примеров использования в практике ведения лесного хозяйства, отметим несколько статей (Gulci et al., 2017; Akay, Tas, 2018; Turk et al., 2022). В настоящее время затруднительно оценить эффективность применения БПЛА для распознавания дорог в сравнении с космическими снимками для региональных проектов. Оценка эффективности будет зависеть от географического расположения района работ, наличия и сложности геометрии дорожной сети, рельефа, инфраструктурной сложности территории и других параметров. Этот вопрос требует дальнейшего исследования и сбора опыта разных стран и регионов. При отсутствии доступа к космической съемке высокого и сверхвысокого пространственного разрешения локальная съемка с БПЛА, с учетом стоимости организации и проведения полевых работ и трудозатрат, может оказаться единственным вариантом получения данных для регулярного мониторинга состояния дорог.

В ближайшие годы именно данные, полученные при помощи БПЛА, будут одним из используемых источников для обновления изображения дорожной сети в разных ГИС-проектах, включая проекты

лесного хозяйства. Определенно то, что съемка из космоса и при помощи БПЛА будут продолжать оставаться двумя основными источниками данных для дешифрирования дорог.

Общими закономерностями в результате анализа статей для разнообразных дорожных проектов и лесного хозяйства можно назвать использование открытых данных Landsat и Sentinel, которые являются самыми доступными. В направлении распознавания лесных дорог по космическим снимкам пока еще мало научных публикаций. Для распознавания дорог самыми информативными и используемыми в настоящее время являются прямые дешифровочные признаки (геометрические, яркостные), затем по количеству упоминаний следуют прямые текстурные признаки. В работах последнего десятилетия группа прямых признаков используется в сочетаниях (яркостные и текстурные, геометрические и яркостные).

Задачи использования космической съемки для распознавания изображения дорог по результатам анализа выборки статей можно разделить на несколь-

ко групп. Во-первых, это потребность в каком-либо материале при отсутствии обновленных данных по сети дорог, во-вторых, отсутствие в открытом доступе точной координатной привязки линейной инфраструктуры дорог и, наконец, необходимость мониторинга покрытия дороги на предмет аварийности и проведение последующих экономических оценок.

Региональные проекты лесного хозяйства сложны, масштабны и, следовательно, затратны по своим ресурсам. Технологической основой для их реализации в части распознавания дорог будут оставаться нейросети, которые непрерывно совершенствуются в своем качестве и объеме данных, становятся открытыми продуктами-коллекциями для исследователей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем», регистрационный номер № 121121600118-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О. А., Конон Н. И., Ратинский М. Г. К вопросу использования дистанционного зондирования местности при проектировании железных дорог // Геодезия и картография. 2019. № 5. С. 47–53. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-947-5-47-53.
- Бектуров А. К. Применение материалов аэрокосмических съемок в изысканиях и проектировании автомобильных дорог в условиях высокогорья // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2015. № 3 (49). С. 43–48.
- Долгополов Д. В. Использование данных дистанционного зондирования Земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 3. С. 151–159.
- Долгополов Д. В., Никонов Д. В., Полуянова А. В., Мелкий В. А. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения // Вестник СГУГиТ. 2019. Т. 24. № 3. С. 65–81.
- Журкин И. Г., Бадышев Т. Т. Анализ изменений железнодорожной сети по космическим снимкам // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 3. С. 83–86.
- Игнатъев А. В., Куликов М. А., Цапиев Д. Н., Тырин В. В. Методика автоматической классификации дорог с использованием нейронной сети Mask R-CNN // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2022. № 5. С. 1–9.
- Мирошниченко С. Ю., Титов В. С., Яценко А. А. Метод автоматической локализации протяженных геопространственных объектов // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 6. С. 17–22.
- Михеева Т. И., Федосеев А. А. Кластеризация гиперспектральных данных мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4 (2). С. 404–408.
- Михеева Т. Н., Федосеев А. А. Идентификация изменений конфигурации транспортной сети на основе космической съемки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4 (4). С. 808–814.
- Мухаметшин А. Р., Самсонов Т. Е. Дешифрирование космических снимков с использованием машинного обучения по данным OpenStreetMap // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова: сборник статей / Под ред. А. М. Карпачевского. — М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. С. 64–72.

- Орлов В. А. Автоматизированное распознавание лесных дорог по космическим снимкам // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2006. № 14. С. 1–4.
- Пестунов И. А., Рылов С. А. Сегментация спутниковых изображений высокого разрешения по спектральным и текстурным признакам // ИнтерЭкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 1. № 4. С. 86–91.
- Подольская Е. С. Применение космических сканерных снимков для объективизации картографической генерализации на обзорно-топографических картах // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 5. С. 83–96.
- Подольская Е. С. Сезонность дорог в транспортном моделировании ГИС-проекта лесного хозяйства // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сборник трудов Национальной научно-практической конференции. М.: РТУ МИРЭА, 2022. С. 267–271.
- Подольская Е. С., Ершов Д. В., Ковганко К. А. Транспортное моделирование наземного доступа для борьбы с лесными пожарами на уровне Федеральных округов России // Сборник статей по итогам научно-технических конференций. Выпуск 11. М.: МИИГАиК, 2020. 199 с. / Приложение к журналу Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». С. 154–156.
- Скрипачев В. О., Гуйда М. В., Гуйда Н. В., Жуков А. О. Исследование свёрточных нейронных сетей для обнаружения объектов на аэрокосмических снимках // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10. № 7. С. 54–64.
- Тормозов В. С., Василенко К. А., Золкин А. Л. Настройка и обучение многослойного персептрона для задачи выделения дорожного покрытия на космических снимках города // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 343–348. DOI: 10.15827/0236-235X.130.343-348.
- Тусикова А. А., Вихтенко Э. М. О распознавании автомобильных дорог на спутниковых снимках с использованием свёрточных сетей MASK-RCNN // V Международная конференция «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления» (ITHPC-2019), Хабаровск, Россия, 2019. С. 308–314.
- Федосеев А. А., Михеева Т. И., Сапрыкин О. П., Мингазов Р. Р. Распознавание объектов транспортной инфраструктуры на гиперспектральных снимках методом глубинного машинного обучения // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2016): труды IV Междун. конф. Уфа: Изд-во УГАТУ. 2016. С. 39–44.
- Федосеев А. А., Михеева Т. И., Михеев С. В. Построение модели транспортной инфраструктуры на основе пространственно-спектральной аэрокосмической информации // Программные продукты и системы. 2018. № 1 (31). С. 25–31.

- Филатова А. В., Поздышева О. Н., Кистинцева А. О. Анализ процесса дешифрирования при строительстве автомобильных дорог // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2017. № 2. С. 1–11.
- Челноков В. В., Мешалкин В. П., Стрелков С. П., Кондрашин К. Г. Визуализация данных дистанционного зондирования дорожных сетей в целях анализа экологического и социо-экологического воздействия // Геодезия и картография. 2021. № 3. С. 36–43. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-969-3-36-43.
- Шошина К. В. Система мониторинга и исследования лесных дорог // Вестник Северного (Арктического) Федерального университета. Серия: Естественные науки. 2013. № 4. С. 50–54.
- Кобзева Е. А. Экспериментальная оценка точности и дешифровочных возможностей космических снимков RapidEye // Geomatics. 2010. № 2. С. 33–36.
- Akay A. E., Tas I. Using drone with a lidar data capture systems in forestry applications // International Academic Research Congress. INES, 2018. P. 17–25.
- Ayala C., Aranda C., Galar M. Towards fine-grained roads maps extraction using Sentinel-2 imagery // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXIV ISPRS Congress (2021 edition). 2021. Vol. 3. P. 9–14.
- Barrile V., Bilotta G., Fotia F., Bernardo E. Road extraction for emergencies from satellite imagery // Computational Science and Its Applications–ICCSA 2020: 20th International Conference, Cagliari, Italy, July 1–4, 2020, Proceedings, Part IV 20. Springer International Publishing, 2020. P. 767–781. DOI: 10.1007/978-3-030-58811-3_55.
- Bhil K., Shindihatti R., Mirza S., Latkar S., Ingle Y. S., Shaikh N. F., Prabu I., Pardeshi S. N. Recent progress in object detection in satellite imagery: a review // Sustainable Advanced Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022. Vol. 840. P. 209–218. DOI: 10.1007/978-981-16-9012-9_18.
- Botelho J. Jr., Costa S. C. P., Ribeiro J. G., Souza C. M. Jr. Mapping roads in the Brazilian Amazon with artificial intelligence and Sentinel-2 // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. P. 1–17. DOI: 10.3390/rs14153625.
- Caliskan E., Sevim Y. Forest road detection using deep learning models // Geocarto International. 2022. Vol. 37. No 20. P. 5875–5890. DOI: 10.1080/10106049.2021.1926555.
- Gecen R., Sarp G. Road detection from high and low resolution satellite images // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing, 2008. P. 355–358.
- Gomes O. F. M., Feitosa R. Q., Coutinho H. L. C. Sub-pixel unpaved roads detection in Landsat images // Proceedings of XXXV Congress ISPRS. Committee 3. 2015. P. 1–5.
- Guindon B. Application of spatial reasoning methods to the extraction of roads from high-resolution satellite imagery //

- IGARSS '98. Sensing and Managing the Environment. International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings. 1998. Vol. 2. P. 1076–1078. DOI: 10.1109/IGARSS.1998.699677.
- Gulci S., Akgul M., Akay A. E., Tas I.* Using ready-to-use drone images in forestry activities: case study of Cinarpinar in Kahramanmaraş, Turkey // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-4/W6. 2017. 4th International GeoAdvances Workshop 14–15 October 2017, Saffranbolu, Karabük, Turkey. P. 51–53.
- Henry C., Azimi S. M., Merkle N.* Road segmentation in SAR satellite images with deep fully-convolutional neural networks // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2864342.
- Maillard Ph., Cavayas F.* Automatic map-guided extraction of roads from SPOT imagery for cartographic database updating // International Journal of Remote Sensing. 1989. No 10 (11). P. 1775–1787. DOI: 10.1080/01431168908904007.
- Mei J., Li R.-J., Gao W., Cheng M.-M.* CoANet: Connectivity attention network for road extraction from satellite imagery // IEEE Transactions on Image Processing. 2021. Vol. 30. P. 8540–8552. DOI: 10.1109/TIP.2021.3117076.
- Mena J. B.* State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification // Pattern Recognition Letters. 2003. Vol. 24. P. 3037–3058.
- Nachmany Y., Alemohammad H.* Detecting roads from satellite imagery in the developing world // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2019. P. 84–89.
- Oehmcke S., Thrysoe C., Borgstad A., Vaz Salles M. A., Brandt M., Gieseke F.* Detecting hardly visible roads in low-resolution satellite time series data // IEEE International Conference on Big Data. 2019. P. 1–10. DOI:10.1109/BigData47090.2019.9006251.
- Podolskaia E., Ershov D., Kovganko K.* Comparison of data sources on transport infrastructure for the regional forest fire management // Managing forests in the 21st century: Book of abstracts, Managing forests in the 21st century, Conference at the Potsdam Institute for Climate Impact Research. Potsdam, 2020. 59 p. DOI: org/10.2312/pik.2020.002.
- Riedl M., Berthold I., Schauer P., Angelhuber M., Fischer P., Canzani E.* How many roads? Object segmentation on satellite imagery in a production environment // Proceedings of 2019 Big Data from Space (BiDS'19). 19–21 February 2019, Munich (Germany). P. 173–176. DOI: 10.2760/848593.
- Satyanarayana V. L., Chandana Ch. G., Bindusha K., Padmanabhudu D., Shahanaaz bhanu G.* Extraction of roads from satellite resolution images using Matlab

// International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2020. Vol. 4. Issue 12. P. 708–714.

Turk Y., Boz F., Aydin A., Eker R. Evaluation of UAV usage possibility in determining the forest roads pavement degradation: preliminary results // European Journal of Forest Engineering. 2022. Vol. 8 (2). P. 77–84.

Wei X., Fu X., Yun Y., Lv X. Multiscale and multi-temporal road detection from high resolution SAR images based attention mechanism // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. p. 3149. DOI: 10.3390/rs 13163149.

Zegeye A. Road extraction from satellite imagery based on fully convolutional neural network // IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE). 2020. Vol. 22. Issue 4. Ser. III. P. 59–72. DOI: 10.9790/0661-2204035972.

REFERENCES

Akay A. E., Tas I., Using drone with a lidar data capture systems in forestry applications, *International Academic Research Congress*, INES, 2018, pp. 17–25.

Andreeva O. A., Konon N. I., Ratinskij M. G., K voprosu ispol'zovanija distancionnogo zondirovanija mestnosti pri proektirovanii zheleznyh dorog (To the question of use remote sensing for railways construction), *Geodezija i kartografija*, 2019, No 5. pp. 47–53. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-947-5-47-53.

Ayala C., Aranda C., Galar M., Towards fine-grained roads maps extraction using Sentinel-2 imagery, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXIV ISPRS Congress (2021 edition), 2021, Vol. 3, pp. 9–14.

Barrile V., Bilotta G., Fotia F., Bernardo E., Road extraction for emergencies from satellite imagery, *ICCSA 2020, LNCS*, pp. 767–781, DOI: 10.1007/978-3-030-58811-3_55.

Bekturov A. K., Primenenie materialov ajer-okosmicheskikh s"emok v izyskanijah i proektirovanii avtomobil'nyh dorog v uslovijah vysokogor'ja (Use of aerospace survey materials in the exploration and design of highways under high-altitude conditions), *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arhitektury im. N. Isanova*, 2015, No 3 (49), pp. 43–48.

Bhil K., Shindihatti R., Mirza S., Latkar S., Ingle Y. S., Shaikh N. F., Prabu I., Pardeshi S. N., Recent progress in object detection in satellite imagery: a review, *Sustainable Advanced Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022, Vol. 840, pp. 209–218, DOI: doi.org/10.1007/978-981-16-9012-9_18.

Botelho J. Jr., Costa S. C. P., Ribeiro J. G., Souza C. M. Jr., Mapping roads in the Brazilian Amazon with artificial intelligence and Sentinel-2, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, pp. 1–17, DOI: 10.3390/rs14153625.

- Caliskan E., Sevim Y., Forest road detection using deep learning models, *Geocarto International*, 2022, Vol. 37, No 20, pp. 5875–5890, DOI: 10.1080/10106049.2021.1926555.
- Chelnokov V. V., Meshalkin V. P., Strelkov S. P., Kondrashin K. G., Vizualizacija dannyh distancionnogo zondirovanija dorozhnyh setej v celjah analiza jekologicheskogo i socio-jekologicheskogo vozdejstvija (Visualization of remote sensing data of road networks for the analysis of ecological and socio-ecological impact), *Geodezija i kartografija*, 2021, No 3, pp. 36–43, DOI: 10.22389/0016-7126-2021-969-3-36-43.
- Dolgoplov D. V., Ispol'zovanie dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli pri formirovanii geoinformacionnogo prostranstva truboprovodnogo transporta (Use of Earth remote sensing data in the geoinformation space of pipeline transport), *Vestnik SGUGiT*, 2020, Vol. 25, No 3, pp. 151–159.
- Dolgoplov D. V., Nikonov D. V., Polujanova A. V., Melkij V. A., Vozmozhnosti vizual'nogo deshifrirovaniya magistral'nyh truboprovodov i ob'ektov infrastruktury po sputnikovym izobrazhenijam vysokogo i sverhvyssokogo prostranstvennogo razresheniya (Possibilities of visual decoding of trunk pipelines and infrastructure facilities from satellite images of high and ultra-high spatial resolution), *Vestnik SGUGiT*, 2019, Vol. 24, No 3, pp. 65–81.
- Fedoseev A. A., Miheeva T. I., Saprykin O. P., Mingazov P. P., Raspoznavanie ob'ektov transportnoj infrastruktury na giperspektral'nyh snimkah metodom glubinogo mashinnogo obuchenija (Recognition of transport infrastructure objects on hyperspectral images by deep machine learning), *Informacionnye tehnologii intellektual'noj podderzhki prinjatija reshenij (ITIDS'2016)*, *Trudy IV Mezhdun. konf.*, Ufa, Izd-vo UGATU, 2016, pp. 39–44.
- Fedoseev A. A., Miheeva T. I., Miheev S. V., Postroenie modeli transportnoj infrastruktury na osnove prostranstvenno-spektral'noj ajerokosmicheskoy informacii (Construction of transport infrastructure model based on the spatial-spectral aerospace information), *Programmnye produkty i sistemy*, 2018, No 1 (31), pp. 25–31.
- Filatova A. V., Pozdysheva O. N., Kistineva A. O., Analiz processa deshifrirovaniya pri stroitel'stve avtomobil'nyh dorog (Analysis of recognition in the construction of highways), *Elektronnyj nauchnyj zhurnal "Inzhenernyj vestnik Dona"*, 2017, No 2, pp. 1–11.
- Gecen R., Sarp G., Road detection from high and low resolution satellite images, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, Vol. XXXVII, Part B4, Beijing, pp. 355–358.
- Gomes O. F. M., Feitosa R. Q., Coutinho H. L. C., Sub-pixel unpaved roads detection in Landsat images, *Proceedings of XXXV Congress ISPRS, Committee 3*, 2015, pp. 1–5.
- Guindon B., Application of spatial reasoning methods to the extraction of roads from high-resolution satellite imagery,

- IGARSS '98. *Sensing and Managing the Environment. International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings*, 1998, Vol. 2, pp. 1076–1078, DOI: 10.1109/IGARSS.1998.699677.
- Gulci S., Akgul M., Akay A. E., Tas I., Using ready-to-use drone images in forestry activities: case study of Cinarpinar in Kahramanmaraş, Turkey, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-4/W6, 2017, 4th International GeoAdvances Workshop 14–15 October 2017, Safranbolu, Karabük, Turkey. pp. 51–53.
- Henry C., Azimi S. M., Merkle N., Road segmentation in SAR satellite images with deep fully convolutional neural networks, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2864342.
- Ignat'ev A. V., Kulikov M. A., Capiev D. N., Tyrin V. V., Metodika avtomaticheskoy klassifikacii dorog s ispol'zovaniem neironnoj seti Mask R-CNN (Method of automatic classification of roads using the neural network Mask R-CNN), *Jelektronnyj nauchnyj zhurnal "Inzhenernyj vestnik Dona"*, 2022, No 5, pp. 1–9.
- Kobzeva E. A., Jeksperimental'naja ocenka tochnosti i deshifrovochnyh vozmozhnostej kosmicheskikh snimkov RapidEye (Experimental evaluation of accuracy and decoding capabilities of RapidEye satellite images), *Geomatics*, 2010, No 2, pp. 33–36.
- Maillard Ph., Cavayas F., Automatic map-guided extraction of roads from SPOT imagery for cartographic database updating, *International Journal of Remote Sensing*, 1989, No 10 (11), pp. 1775–1787, DOI: 10.1080/01431168908904007.
- Mei J., Li R.-J., Gao W., Cheng M.-M., CoANet: Connectivity attention network for road extraction from satellite imagery, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2021, Vol. 30, pp. 8540–8552, DOI: 10.1109/TIP.2021.3117076.
- Mena J. B., State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification, *Pattern Recognition Letters*, 2003, Vol. 24, pp. 3037–3058.
- Miheeva T. I., Fedoseev A. A., Klasterizacija giperspektral'nyh dannyh monitoringa ob'ektov transportnoj infrastruktury (Clustering of hyperspectral monitoring data of transport infrastructure facilities), *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2014, Vol. 16, No 4 (2), pp. 404–408.
- Miheeva T. N., Fedoseev A. A., Identifikacija izmenenij konfiguracii transportnoj seti na osnove kosmicheskoy s'emki (Identification of transport network configuration changes based on satellite imagery), *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2016, Vol. 18, No 4 (4), pp. 808–814.
- Miroshnichenko S. Ju., Titov V. S., Jashenko A. A., Metod avtomaticheskoy lokalizacii protjazhennyh geoprostranstvennyh ob'ektov (Method of automatic lo-

- calization of extended geospatial objects), *Izvestija vuzov. Priborostroenie*, 2013, Vol. 56, No 6, pp. 17–22.
- Muhametshin A. R., Samsonov T. E., Deshifrirovaniye kosmicheskikh snimkov s ispol'zovaniem mashinnogo obucheniya po dannym OpenStreetMap (Space images interpretation with machine learning based on the OpenStreetMap) *Nauchnye issledovaniya molodykh uchennykh-kartografov, vypolnennyye pod rukovodstvom sotrudnikov kafedry kartografii i geoinformatiki geograficheskogo fakul'teta MGU imeni M. V. Lomonosova: sbornik statej*, pod red. A. M. Karpachevskogo, Moscow, "KDU", "Dobrosvet", 2022, pp. 64–72.
- Nachmany Y., Alemohammad H., Detecting roads from satellite imagery in the developing world, *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019, pp. 84–89.
- Oehmcke S., Thrysoe C., Borgstad A., Vaz Salles M. A., Brandt M., Gieseke F., Detecting hardly visible roads in low-resolution satellite time series data, *IEEE International Conference on Big Data*, 2019, pp. 1–10, DOI:10.1109/BigData47090.2019.9006251.
- Orlov V. A., Avtomatizirovannoe raspoznavanie lesnykh dorog po kosmicheskim snimkam (Automated recognition of forest roads based on satellite images), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2006, No 14, pp. 1–4.
- Pestunov I. A., Rylov S. A., Segmentaciya sputnikovykh izobrazhenij vysokogo razresheniya po spektral'nym i teksturnym priznakam (Segmentation of satellite images of high spatial resolution by spectral and textural features), *InterJekspo Geo-Sibir'*, 2012, Vol. 1, No 4, pp. 86–91.
- Podolskaia E. S., Sezonnost' dorog v transportnom modelirovanii GIS-proekta lesnogo hozjajstva (Seasonality of roads in the transport modeling of GIS forestry project), *Fundamental'nye, poiskovye, prikladnye issledovaniya i innovatsionnye proekty. Sbornik trudov Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii*, Moscow, RTU MIRJeA, 2022, pp. 267–271.
- Podolskaia E. S., Primenenie kosmicheskikh skanernykh snimkov dlja ob'ektivizacii kartograficheskoy generalizacii na obzorno-topograficheskikh kartah (Application of space scanner images for objectification of map generalization on the survey-and-topographic maps), *Izv. vuzov. Ser. Geodezija i ajerofotos'emka*, 2005, No 5, pp. 83–96.
- Podolskaia E. S., Ershov D. V., Kovganko K. A., Transportnoe modelirovanie nazemnogo dostupa dlja bor'by s lesnymi pozharemi na urovne Federal'nykh okrugov Rossii (Transport modeling of ground access to fight the forest fires at the level of the Federal Districts of Russia), *Sbornik statej po itogam nauchno-tehnicheskikh konferencij*, 2020, No 11, Moscow: MIIGAiK. Prilozhenie k zhurnalu *Izvestija vuzov "Geodezija i ajerofotos'emka"*, pp. 154–156.
- Podolskaia E., Ershov D., Kovganko K., Comparison of data sources on transport in-

- frastructure for the regional forest fire management, *Managing forests in the 21st century: Book of abstracts, Managing forests in the 21st century, Conference at the Potsdam Institute for Climate Impact Research*, Potsdam 2020, 59 p. DOI: 10.2312/pik.2020.002.
- Riedl M., Berthold I., Schauer P., Angelhuber M., Fischer P., Canzani E., How many roads? Object segmentation on satellite imagery in a production environment, *Proceedings of 2019 Big Data from Space (BiDS'19)*, 19-21 February 2019, Munich (Germany), pp. 173–176. DOI: 10.2760/848593.
- Satyanarayana V. L., Chandana Ch. G., Bindusha K., Padmanabhudu D., Shahanaaz bhanu G., Extraction of roads from satellite resolution images using Matlab, *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 2020, Vol. 4, No 12, pp. 708–714.
- Shoshina K. V., Sistema monitoringa i issledovaniya lesnyh dorog (Forest road monitoring and research system), *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) Federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2013, No 4, pp. 50–54.
- Skripachev V. O., Gujda M. V., Gujda N. V., Zhukov A. O., Issledovanie svertochnykh nejronnykh setej dlja obnaruzheniya ob"ektov na ajerokosmicheskikh snimkah (Research of convolutional neural networks to detect objects on the aerospace images), *International Journal of Open Information Technologies*, 2022, Vol. 10, No 7, pp. 54–64.
- Tormozov V. S., Vasilenko K. A., Zolkin A. L., Nastrojka i obuchenie mnogoslojnogo perseptrona dlja zadachi vydelenija dorozhnogo pokrytija na kosmicheskikh snimkah goroda (Setup and training of a multilayer perceptron for the task of highlighting the pavement on satellite images of the city), *Programmnye produkty i sistemy*, 2020, Vol. 33, No 2, pp. 343–348, DOI: 10.15827/0236-235X.130.343-348.
- Turk Y., Boz F., Aydin A., Eker R., Evaluation of UAV usage possibility in determining the forest roads pavement degradation: preliminary results. 3rd International Engineering Research Symposium, INERS'19. Comparison of Autonomous and Manual UAV Flights in Determining Forest Road Surface Deformations, *European Journal of Forest Engineering*, 2022, Vol. 8 (2), pp. 77–84.
- Tusikova A. A., Vihtenko Je. M., O raspoznavanii avtomobil'nyh dorog na sputnikovyh snimkah s ispol'zovaniem svertochnykh setej MASK-RCNN (About the recognition of highways on satellite images using convolutional networks MASK-CNN), *V Mezh-dunarodnaja konferencija "Informacionnye tehnologii i vysokoproizvoditel'nye vuchyslenija" (ITHPC-2019)*, Habarovsk, Rossija, 2019, pp. 308–314.
- Wei X., Fu X., Yun Y., Lv X., Multiscale and multitemporal road detection from high resolution SAR images based attention mechanism, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, p. 3149. DOI: 10.3390/rs 13163149.

Zegeye A., Road extraction from satellite imagery based on fully convolutional neural network, *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 2020, Vol. 22, No 4, Ser. II, pp. 59–72, DOI: 10.9790/0661-2204035972.

Zhurkin I. G., Badyshev T. T., Analiz izmenenij zheleznodorozhnoj seti po kosmicheskim snimkam (Analysis of changes in the railway network based on satellite images), *Izvestija vysshih uchebnyh zvedenij. Geodezija i ajerofotos'emka*, 2014, Vol. 3, pp. 83–86.

USE OF REMOTE SENSING DATA FROM SPACE FOR ROAD IMAGE RECOGNITION IN THE FORESTRY

E. S. Podolskaia

*Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russia*

E-mail: podols_kate@mail.ru

Received: 08.10.2022

Revised: 19.12.2022

Accepted: 20.12.2022

Paper presents an overview of history and current research state on the use of remote sensing data from space to recognize roads for the regional projects. We have characterized principles of road detection on the imagery. A group of direct deciphering signs used in combinations such as brightness and texture, geometry and brightness. Three research directions with examples identified: visual roads recognition, use of special software and libraries for developers, and use of neural networks. For the road network detection we have described methods and software, type and spatial resolution of imagery. Road image recognition based on the optical survey from the open and commercial sources, machine learning methods and neural networks. Actual tasks of road recognition are the following: evaluation of road surface condition, modeling of existing roads location, designing and building new roads, seasonality of roads use. A functionality summary of MapFlow plugin for road recognition in Open Source QGIS is given. Paper is a part of regional forestry transport modeling project to access the forest fires and forest resources by ground means.

Key words: remote sensing data from space, road network, image recognition, forestry, neural networks, convolutional neural networks, Open Source QGIS, plugins, MapFlow

Рецензент: к. б. н. Елсаков В. В.