

На правах рукописи

Тарасов Андрей Владимирович



Оперативное картографирование нарушений лесного покрова
на основе спутниковых данных с высоким пространственно-временным
разрешением

25.00.33 – Картография

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Научный руководитель – доктор географических наук, профессор
Пьянков Сергей Васильевич.

Официальные оппоненты:

Ступин Владимир Павлович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии;

Чупина Дарья Анатольевна, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий и дистанционного зондирования (284).

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (г. Москва).


Защита состоится 30 ноября 2021 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.251.04 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/tarasov-andrey-vladimirovich/>

Автореферат разослан «15» октября 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Дубровский Алексей Викторович

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 27.09.2021. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 125.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день остро стоит вопрос об оперативном предоставлении актуальной и наиболее полной пространственной информации для принятия оптимальных управленческих решений в лесной отрасли. Наиболее эффективным инструментом для решения многих задач в данной области являются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Современный этап развития ДЗЗ из космоса характеризуется стремительным ростом числа действующих на орбите спутников и одновременным увеличением пространственного и временного разрешения данных, что приводит к взрывному росту их объема. С одной стороны, это позволяет существенно расширить круг задач, решаемых на основе данных ДЗЗ, в том числе для мониторинга лесного хозяйства, а с другой стороны, возникает необходимость в разработке новых алгоритмов, обеспечивающих автоматизированное распознавание объектов на спутниковых снимках.

Спутниковые снимки и результаты их автоматизированной обработки (тематические продукты) являются одним из основных источников данных для оперативного картографирования, роль которого в последние годы непрерывно возрастает. Оперативное картографирование — это относительно новое направление в картографии, которое разрабатывается с конца 1990-х гг. Разработке этой тематики в России посвящены работы и труды Берлянта А. М., Богданова В. Н., Воронова А. Е., Кузьминых С. А., Салищева К. А., Рублева И. В., Сухих В. И., Ступина В. П., Чупиной Д. А., Щербакова Ю. С. и др.

Оперативное картографирование нарушений лесного покрова, связанных как с лесозаготовкой, так и с другими природными и антропогенными факторами, является одной из важнейших сфер применения данных ДЗЗ. Ранее разработанные методы распознавания нарушений лесного покрова по спутниковым снимкам, основанные на расчете различных вегетационных индексов и других преобразованиях спектральных каналов, уже не отвечают современным требованиям к точности и степени автоматизации систем мониторинга. В частности, по

мере повышения пространственного разрешения снимков растёт значимость текстурных и геометрических признаков, которые вообще не учитываются этими методами. Следовательно, требуется разработка новых алгоритмов, адаптируемых к современным спутниковым данным. Перспективным подходом является применение сверточных нейронных сетей, которые в последние годы оцениваются как наиболее эффективные алгоритмы анализа изображений.

Степень разработанности темы исследования. Данные спутниковой съемки применяются для обнаружения и оперативного картографирования нарушений лесного покрова с 1970-х гг., когда был запущен первый спутник серии Landsat. За последующие годы было разработано множество методов, основанных на вегетационных индексах, анализе главных компонент, анализе векторов изменений, одноканальном и многоканальном обнаружении изменений, деревьях решений и др. Стоит отметить работы Аллена Т. Р., Нильсена А. А., Хансена М. С. и др.

Алгоритмы на основе сверточных нейронных сетей были разработаны и стали использоваться для сегментации спутниковых снимков в середине прошлого десятилетия. В настоящее время они применяются для маскирования облачности, классификации типов землепользования и решения ряда других задач. Это показано в работах Андреева Д. Н., Исаенкова К., Лараби М., Ронненберга О., Сирриса В., Хеткоата М. Г. и др. Однако опыт оперативного картографирования нарушений лесного покрова с применением этих методов пока весьма ограничен. Большинство работ посвящены мониторингу экваториальных лесов. Лишь в последний год были опубликованы работы по распознаванию вырубок и ветровалов в лесах умеренного пояса по общедоступным спутниковым снимкам Sentinel-2, которые показали высокую перспективность этих алгоритмов.

В России, несмотря на имеющийся значительный опыт в области создания систем дистанционного мониторинга лесов, пока не существует готовых алгоритмов и сервисов по распознаванию нарушений лесного покрова с применением сверточных нейронных сетей. Между тем, создание подобных алгоритмов и сервисов мониторинга на основе технологий веб-картографирования исключи-

тельно актуально, в том числе в связи со значительным объемом незаконных рубок леса. Разработкой алгоритмов выявления нарушений лесного покрова по спутниковым снимкам и систем их мониторинга посвящены работы авторов Алексаниной А. И., Барталева С. А., Владимировой Н. А., Крылова А. М., Лабутиной И. А., Лупяна Е. А., Потапова П. В. и др.

Цель и задачи исследования. Цель исследования состоит в разработке и валидации нового метода оперативного картографирования нарушений лесного покрова с применением сверточных нейронных сетей.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– рассмотреть и обобщить российский и зарубежный опыт мониторинга и оперативного картографирования нарушений лесного покрова по спутниковым снимкам оптического диапазона, выявить основные преимущества и недостатки традиционных и новых (основанных на технологиях машинного обучения) методов;

– оценить возможность применения методов машинного обучения для маскирования облачности на снимках оптического диапазона;

– подготовить обучающую выборку и разработать методику выявления нарушений лесного покрова по спутниковым снимкам с применением сверточных нейронных сетей для целей оперативного картографирования;

– оценить применимость разработанной методики для выявления нарушений лесного покрова с учетом сезонного фактора и особенностей лесопользования;

– разработать прототип картографического веб-сервиса для оперативного картографирования нарушений лесного покрова;

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются нарушения лесного покрова.

Предметом исследования являются новые методы мониторинга и оперативного картографирования по снимкам оптического диапазона.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– впервые выявлены преимущества и недостатки алгоритмов машинного обучения для целей маскирования облачности по спутниковым снимкам Sentinel-2 и PlanetScore, в сравнении с традиционными алгоритмами в разрезе разных сезонов и типов облачности;

– разработаны новые алгоритмы для идентификации нарушений лесного покрова на основе сверточных нейронных сетей по спутниковым снимкам Sentinel-2, в том числе для осеннего и весеннего периода, рассчитана точность их распознавания;

– установлено, что точность распознавания нарушений лесного покрова по снимкам Sentinel-2 с применением разработанного метода более чем в два раза превышает аналогичный показатель для традиционных пороговых методов, учитывающих только спектральные признаки;

– доказано увеличение качества и эффективности обнаружения выборочных рубок по спутниковым снимкам Sentinel-2 с применением созданных моделей машинного обучения, и получены соответствующие оценки точности.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость состоит в усовершенствовании методов оперативного картографирования нарушений лесного покрова по спутниковым данным на основе одного из наиболее эффективных алгоритмов анализа изображений – сверточных нейронных сетей архитектуры U-net. Выполненная оценка точности распознавания вырубок в зависимости от сезона съемки и типов лесопользования позволила получить новые знания о преимуществах и ограничениях данного алгоритма.

Диссертационное исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-35-90005 «Оперативное картографирование нарушений лесного покрова на основе спутниковых данных с высоким пространственно-временным разрешением».

Практическая значимость полученных результатов очевидна в связи с тем, что оперативное получение информации о нарушениях лесного покрова как антропогенного, так и природного происхождения является одной из ключевых задач современного лесного хозяйства. В настоящее время разрабатывается мно-

жество систем дистанционного мониторинга лесов различного территориального охвата. Разработанные автором алгоритмы потенциально могут быть либо встроены в работу одной из таких систем, либо стать основой для создания новой системы мониторинга. Также результаты работы использовались при реализации проекта по дистанционному мониторингу лесов Добрянского и Вайского лесничеств Пермского края на основе данных Sentinel-2 и PlanetScope в 2018–2019 гг. и при формировании отчетов крупных и средних лесопользователей в рамках исполнения приказа № 451 Министерства природных ресурсов и экологии РФ.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационной работы являются научные публикации российских и зарубежных авторов, посвященные проблемам мониторинга и оперативного картографирования нарушений лесного покрова на основе данных ДЗЗ и применению алгоритмов машинного обучения для автоматизации обработки спутниковых снимков.

Для решения задач диссертационного исследования использованы следующие методы: сегментация изображений с применением сверточных нейронных сетей, традиционные методы мультивременного анализа спутниковых снимков, статистические методы для оценки точности распознавания, геоинформационное картографирование для представления полученных результатов. Создание обучающих наборов данных основано на визуально-интерактивном дешифрировании спутниковых снимков. Для реализации алгоритмов обработки изображений разработаны программные инструменты на языке программирования Python с применением библиотеки с алгоритмами машинного обучения TensorFlow. Картографический веб-сервис разработан с помощью технологий Vue и Leaflet.

Положения, выносимые на защиту:

– применение алгоритмов машинного обучения повышает качество маскирования облачности на спутниковых снимках Sentinel-2, а также на снимках PlanetScope с наличием снежного покрова, что позволяет повысить точность картографирования нарушений лесного покрова;

– в сравнении с традиционными методами, основанными только на спектральных признаках, использование сверточных нейронных сетей архитектуры

U-net обеспечивает существенное повышение точности обнаружения и оперативного картографирования нарушений лесного покрова по разновременным снимкам Sentinel-2 в любой сезон года;

– алгоритмы на основе сверточных сетей позволяют выделять выборочные и проходные рубки как целостный объект, в отличие от традиционных методов, основанных на спектральных признаках, что увеличивает оперативность картографирования за счет снижения затрат на проведение генерализации;

– разработанный прототип картографического веб-сервиса обеспечивает высокую оперативность картографирования нарушений лесного покрова с предоставлением пользователям информации в оптимальном для них формате.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика диссертации соответствует областям исследований: 9 – Геоинформационное картографирование и компьютерные технологии и пункта 10 – Тематическое дешифрирование и методы дистанционного (аэрокосмического) зондирования паспорта научной специальности 25.00.33 – Картография, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Личный вклад автора в диссертационное исследование заключается в выборе методов, создании обучающей выборки, проведении экспериментов с моделями машинного обучения для маскирования облачности и идентификации нарушений лесного покрова, оценке результатов экспериментов. Автором также разработан веб-сервис для оперативного картографирования нарушений лесного покрова. Подготовка к печати научных работ, отражающих результаты исследований, осуществлялась как самостоятельно, так и при участии соавторов.

Степень достоверности и апробация результатов исследования обеспечивается значительным объемом выборки для обучения нейронной сети, а также сопоставлением результатов автоматического распознавания с проверочными наборами данных, созданными на основе визуально-интерактивного дешифрирования снимков, а также непосредственных измерений на местности, полученных из приложений к лесным декларациям лесопользователей. При оценке достоверности распознавания объектов на снимках использовались общепринятые метрики на основе матрицы ошибок.

Основные результаты исследований докладывались на научно-практических конференциях различного уровня:

– на Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2018 г.);

– XVI Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск, 2020 г.);

– Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Цифровая география» (г. Пермь, 2020 г.);

– III, VI Международных конференциях «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (г. Красноярск, 2016, 2019 гг.).

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 12 научных статьях, из которых три – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, четыре – в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено одно Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 150 наименований. Материал работы изложен на 135 страницах машинописного текста и включает в себя 13 таблиц, 46 рисунков, 10 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, излагаются цели и задачи исследования, дана оценка их научной новизны и практической значимости, сформулированы защищаемые положения.

В первом разделе анализируется понятие оперативного картографирования, его роль в картографии, применение его в лесном хозяйстве при картографировании нарушений лесного покрова, представлена классификация нарушений, опи-

саны основные источники данных. Оперативное картографирование предполагает создание и использование карт в реальном или близком к реальному масштабу времени с целью быстрого (своевременного) информирования пользователей и воздействия на ход процесса. Берлянт А. М. предложены три основных принципа оперативного картографирования, которые обеспечивают его эффективность:

- надежность автоматической системы, которая, в свою очередь, зависит от скорости ввода и обработки данных, организации баз данных и системы доступа к ним, быстродействия вычислительных систем;

- хорошая читаемость и воспринимаемость самих оперативных карт, простота их внешнего оформления, адекватный подбор знаков и шкал, обеспечивающих эффективное зрительное восприятие в условиях оперативного анализа ситуаций;

- оперативность распространения карт и доставки их потребителям, в том числе, с использованием для этого телекоммуникационных сетей.

С учетом обобщения российского и зарубежного опыта оперативного картографирования оценена применимость новых спутниковых данных с высоким пространственным и временным разрешением для картографирования разных типов нарушений лесного покрова с целью увеличения надежности автоматической системы (первый принцип эффективного оперативного картографирования). Благодаря появлению новых спутников становится возможным применять методы оперативного картографирования в новых областях, (а также улучшать качество существующих методов), что увеличивает оперативность предоставления актуальной информации для принятия управленческих решений. С появлением новых данных повышается роль текстурных и геометрических признаков, которые не учитываются в традиционных методах выявления нарушений лесного покрова. Новые методы машинного обучения способны включать эту группу признаков в анализ, что позволит увеличить качество и точность идентификации нарушений лесного покрова, что важно для оперативного картографирования. Описан российский и зарубежный опыт применения этой группы алгоритмов для решения задач обработки данных ДЗЗ, и в частности детектирования нарушений лесного покрова. Анализ литературы, нормативных источников и существующих систем

мониторинга показал, что разработка систем оперативного картографирования лесов с использованием web-сервисов имеет большую перспективу при следовании принципам эффективного оперативного картографирования.

Во втором разделе проведена сравнительная оценка точности маскирования облачности с применением традиционных методов, основанных на растровой арифметике, и алгоритма машинного обучения s2cloudless. Облачность – основной фактор, ограничивающий применимость данных космической съемки Земли в оптическом диапазоне спектра. Наличие облаков и сопутствующих им теней влияет на информационную емкость снимков. Качественное маскирование облачности на снимках имеет все большее значение по мере роста объемов данных с различных спутников, увеличения площади мониторинга за природными и техногенными объектами, в частности для решения задач лесного и сельского хозяйства. Проведена оценка точности маскирования облачности по снимкам Sentinel-2 на примере территории Пермского края в разрезе разных сезонов года и разных типов облачности. Разработаны инструменты для автоматической загрузки необходимых снимков, их предобработки для создания единого покрытия интересующей территории. Доказано, что применение методов машинного обучения повышает точность маскирования облачности на снимках Sentinel-2 на 5–10 % вне зависимости от сезона, причем повышается точность детектирования как сплошной, так и полупрозрачной облачности, за счет возможности этой группы алгоритмов обобщать закономерности в обучающем наборе и переносить их на новые данные. На основе алгоритма s2cloudless проведены эксперименты по маскированию облачности на снимках PlanetScope и показано, что точность маскирования можно существенно увеличить только в период со снежным покровом. При отсутствии снежного покрова, облачность точно маскируется и без применения методов машинного обучения.

В третьем разделе рассматривается создание нового алгоритма на основе методов машинного обучения для выявления нарушений лесного покрова и оценивается его применимость. Эксперименты проводились с использованием сверточных нейронных сетей двух типов – детектор (YOLO) и сегментатор (U-net). В связи с

полученными низкими оценками точности при распознавании нарушений лесного покрова с помощью детектора, эксперименты в этом направлении были прекращены. Для обучения сегментатора (U-net) создана обучающая выборка (рисунок 1) для разных сезонов года. При создании выборки каждому объекту присваивался тип (выборочная рубка, сплошная рубка, лесная дорога, ветровал, пожар) и был определен диапазон дат его появления. Итоговая обучающая выборка представляет векторный слой с нарушениями лесного покрова (3 612 объектов), включая 2 600 сплошных вырубок, 702 выборочные вырубки, 290 участков лесных дорог, 20 ветровалов. Для формирования выборки использовано 98 снимков Sentinel-2. Разработаны инструменты для приведения обучающей выборки к формату, который может использоваться при обучении сверточных нейронных сетей.

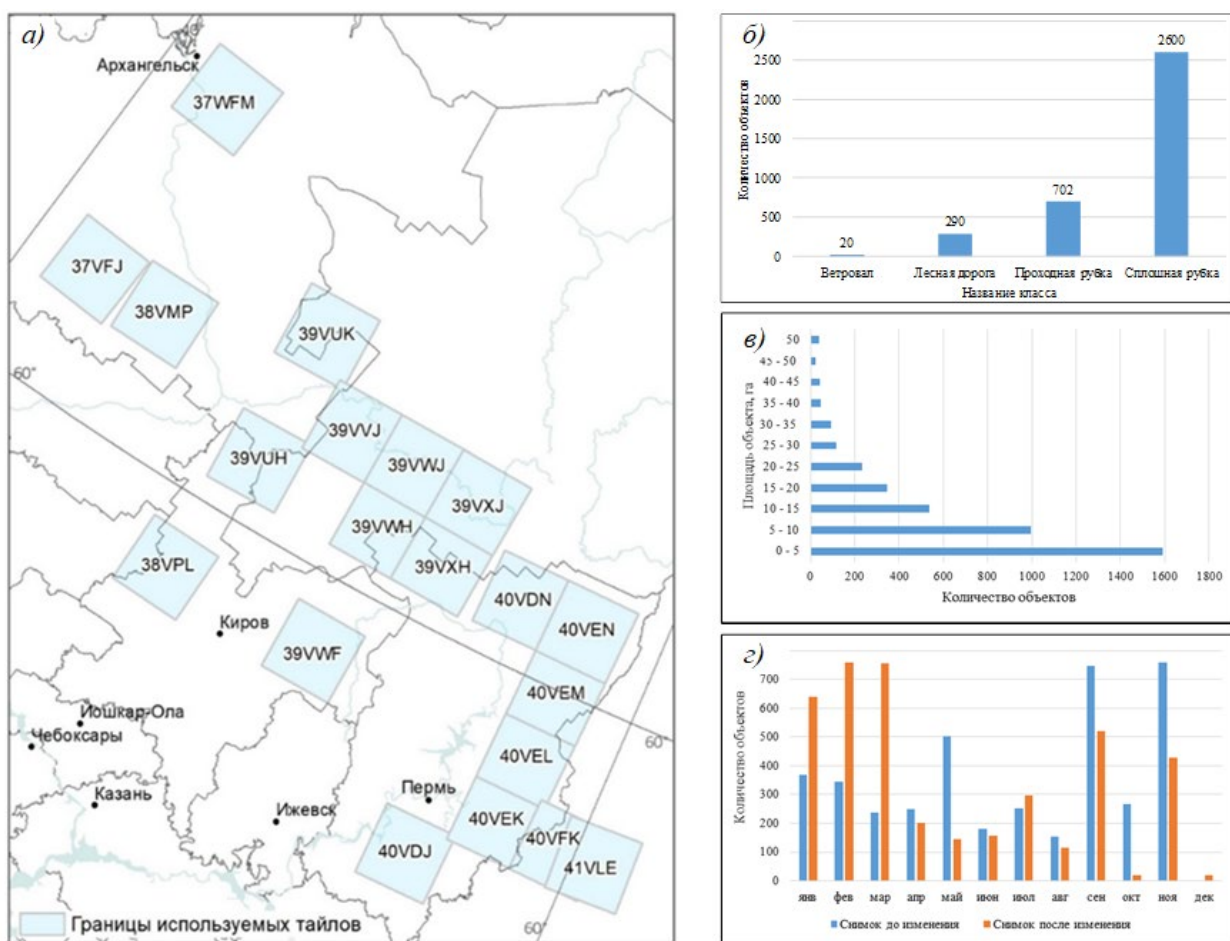


Рисунок 1 – Территория создания обучающей выборки (а) и ее базовые характеристики: б) распределение по типам; в) распределение по диапазонам площадей; г) распределение по месяцам

Рассмотрены подходы к построению моделей машинного обучения для выявления нарушений лесного покрова на основе базовой модели архитектуры U-net. Описаны результаты 50 экспериментов по модификации гиперпараметров базовой архитектуры, приведены результаты обучения как одной общей модели, так и отдельных моделей по сезонам (рисунок 2).

Далее выполнено сравнение точности распознавания нарушений лесного покрова с помощью разработанного алгоритма и традиционных методов. Из всего многообразия традиционных методов были выбраны метод одноканального обнаружения изменений по красному каналу – для зимней группы изменений, и разность индекса Normalized Burned Ratio (NBR) для летнего и переходного периодов. Эти методы широко применяются при анализе разновременных изображений. Пороговые значения устанавливались экспертно для каждой контрольной сцены. В качестве метрики оценки точности использовалась *F-мера*. Было проведено сравнение между моделью, адаптированной для всех сезонов, и отдельными моделями для каждого сезона года (таблица 1). В среднем по восьми контрольным сценам точность распознавания нарушений лесного покрова по разработанной модели составила 48 %, а традиционными методами – 23 %. В зимний период повышение точности распознавания по разработанной модели достигается за счет устойчивости к наличию теней.

Наименьшая точность наблюдается в переходный период, что объясняется сильным изменением значений яркости между изображениями (при наличии снежного покрова на одном из двух снимков).

Помимо этого, было оценено количество объектов, которые выделяются для одного контрольного, что является показательным значением для оценки качества выделения выборочных и проходных рубок.

Во всех случаях разработанные модели выявляют меньше объектов для одного контрольного, чем традиционные методы, причем наибольшее различие наблюдается в переходные сезоны.

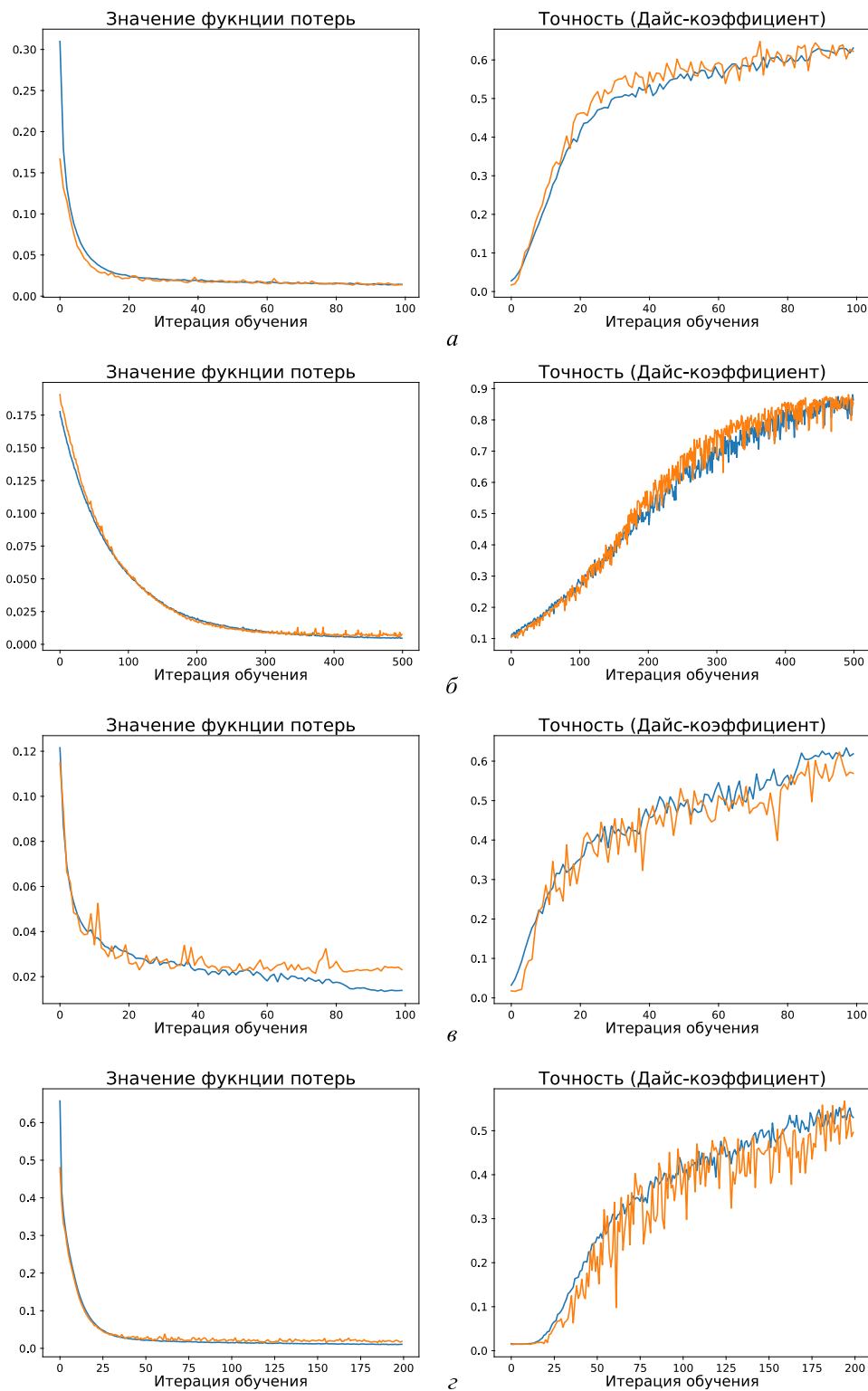


Рисунок 2 – Основные показатели обучения лучших моделей: а) при обучении по всем группам изменений; б) при обучении на летней группе изменений; в) при обучении на зимней группе изменений; г) при обучении на переходной группе изменений

Таблица 1 – Значения F -меры для контрольных данных

Тайл Sentinel-2	Дата первого снимка	Дата второго снимка	Период изменений	Точность традиционных методов, %	Алгоритм машинного обучения с самой высокой точностью			
					обученный на всех сезонах, %	обученный на зимнем сезоне, %	обученные на переходном сезоне, %	обученный на летнем сезоне, %
T40VEM	20.11.2019	24.03.2020	зимний	06	51	56	-	-
T40VEM	2017.11.25	13.02.2018	зимний	33	67	65	-	-
T37VFJ	08.03.2018	31.07.2018	переходный	09	41	-	41	-
T38VMP	22.03.2020	22.06.2020	переходный	43	39	-	42	-
T39VWF	25.05.2017	23.08.2017	летний	16	38	-	-	49
T39VXH	29.06.2018	04.09.2018	летний	62	60	-	-	59
T37WFM	18.07.2020	04.10.2020	летний	13	56	-	-	36
T38VPL	17.06.2018	01.08.2018	летний	05	27	-	-	61

* зеленым цветом отмечены алгоритмы, которые показали самую высокую точность, для контрольной сцены.

- значение не рассчитывалось.

На рисунке 3 представлены примеры выделения выборочных рубок моделью, обученной на всех группах изменений. Отметим, что на рисунке 3, в объект вообще не был выделен традиционными методами. Такие результаты говорят о том, что алгоритмы на основе машинного обучения учитывают форму, которая является одним из основных дешифровочных признаков при выявлении нарушений лесного покрова. В результате экспериментов установлено, что модель способна выявлять нарушения и на снимках с разницей в год, несмотря на то, что подобных данных не было в исходной выборке. Выделение выборочных рубок как единого пространственного объекта позволяет сократить время на дальнейшую обработку результатов (генерализацию) при оперативном картографировании.

Помимо оценки точности по сезонам, на примере территории Пермского края была оценена точность работы алгоритмов на участках с разным характером лесопользования.

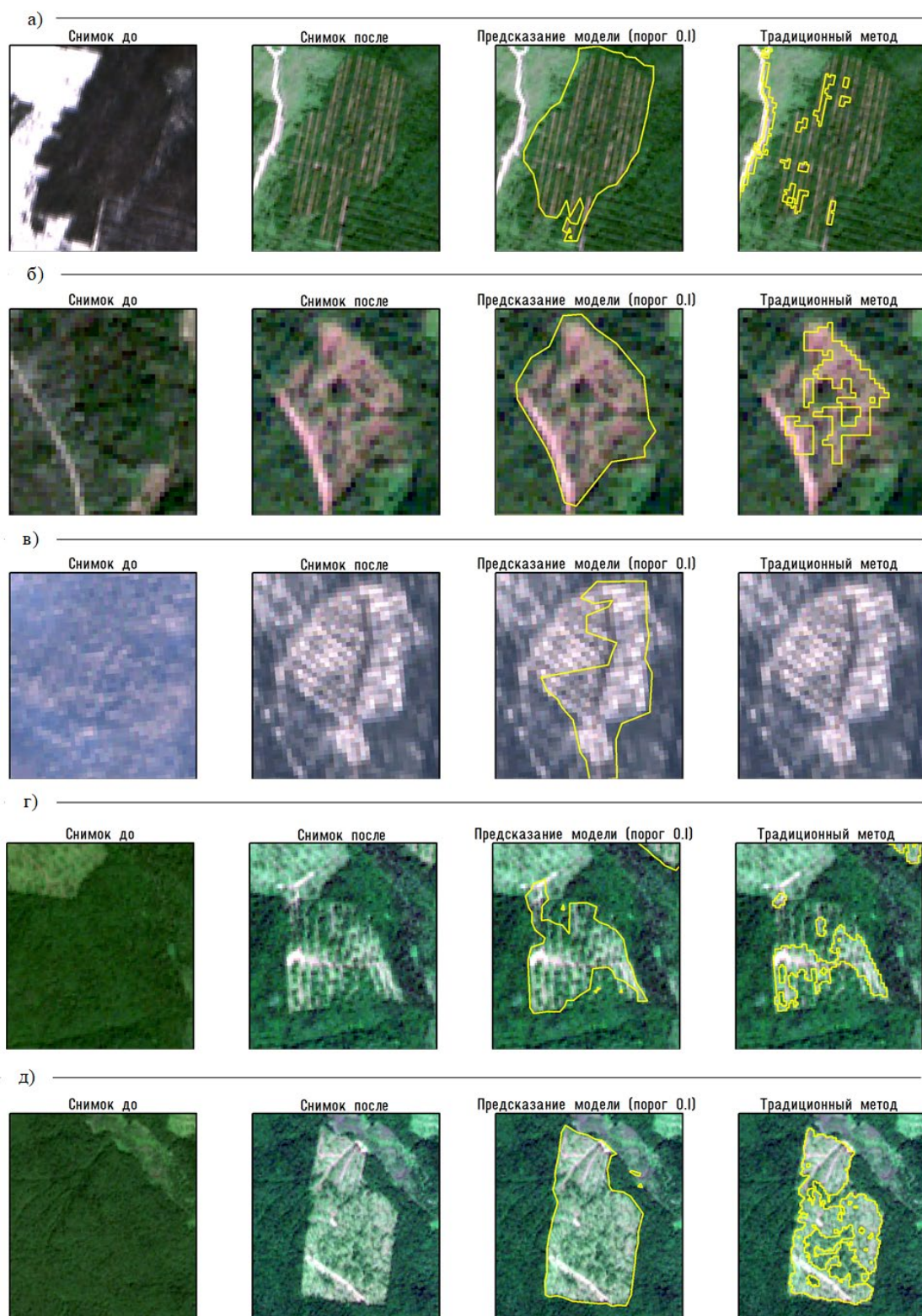


Рисунок 3 – Примеры выделения выборочных рубок по снимкам разных периодов: а) переходный; б) летний; в) зимний; г), д) летний период с разницей снимков около одного года

Выделены три тестовых участка – зона с преобладанием выборочных и проходных рубок при значительной площади сельхозугодий (№ 1), с высокой долей проходных рубок (№ 2), с преобладанием сплошных рубок (№ 3) (таблица 2).

Таблица 2 – Процент выявленных объектов в контрольных зонах

Зона	Процент выделенных рубок	Процент невыделенных	Процент ложно выделенных рубок	Средняя площадь ошибочно	Средняя площадь невыде-
1	91,4	8,6	6,4	0,4	4,1
2	93,9	6,1	7,0	0,5	2,7
3	94,5	5,5	8,2	0,7	5,3

Во всех случаях доля выявленных объектов моделью составила свыше 90 %, причем как при расчете по площади, так и по количеству. Доля пропусков объектов составила в среднем 6 %, а ложных срабатываний – 7,7 %. Стоит отметить, что при использовании фильтра по площади со значением меньше 1,0 га или других алгоритмов фильтрации долю ложных срабатываний можно сократить до 4 %. Такой вывод сделан на основе средней площади ошибочно выделенного объекта (0,7 га). Ложные срабатывания возникают чаще всего в руслах и поймах рек по причине колебаний уровня воды и связанных с этим резких изменений яркостных характеристик. Исключение этих участков из анализа также позволит значительно сократить частоту ложных тревог.

В четвертом разделе описан процесс создания картографического сервиса для представления оперативных карт конечным потребителям. Архитектура разработанного сервиса представлена на рисунке 4, пример сформированной карты – на рисунке 5. Основными функциями сервиса являются пообъектный просмотр изменений и возможность формировать карту по выбранному объекту. Эта карта содержит необходимую информацию для лесопользователей, а именно характеристику площади и местоположение выявленного нарушения лесного покрова. Аналогичная компоновка использовалась как отчетная форма в ходе реализации проекта по ежемесячному спутниковому мониторингу лесопользования на территории Добрянского лесничества. Разработанная форма также соответствует требованиям к оформлению приложения к отчету о проведенных лесохозяй-

ственных мероприятиях в рамках приказов Министерства природных ресурсов и экологии РФ.

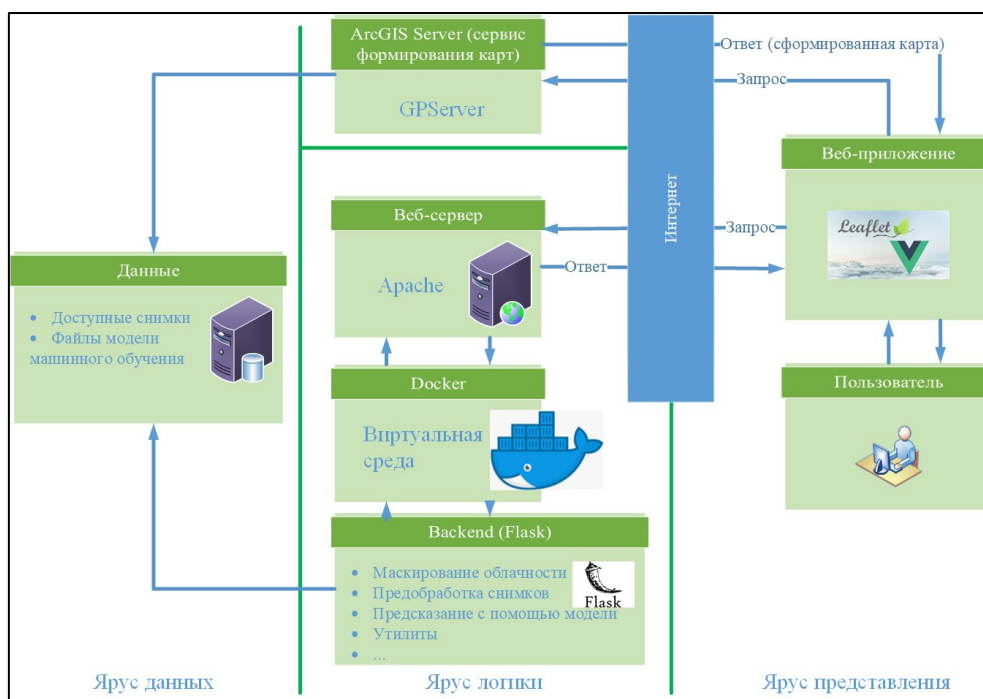


Рисунок 4 – Архитектура разработанного веб-сервиса



Рисунок 5 – Пример сформированного картографического материала с подложкой на основе красного канала (B4) снимка Sentinel-2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа содержит полученные автором новые результаты в области разработки методов оперативного картографирования нарушений лесного покрова по спутниковым данным с высоким пространственным и временным разрешением.

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

– в результате проведенного анализа литературы установлено, что на сегодняшний день остро стоит вопрос об оперативном предоставлении актуальной и наиболее полной пространственной информации для принятия управленческих решений в лесной отрасли, с учетом появления новых источников данных ДЗЗ, которые обладают высоким пространственным и временным разрешением (PlanetScope, Sentinel-2), становится возможным применять методы оперативного картографирования и в лесной отрасли. В то же время государственные организации РФ, ответственные за проведение мероприятий по охране, защите, контролю пользования лесов, заинтересованы в использовании новых данных ДЗЗ для улучшения качества, оперативности, точности оценки нарушений лесного покрова и снижения затрат. Таким образом, разработка систем оперативного картографирования лесов на основе применения новых методов машинного обучения и новых данных ДЗЗ с использованием web-сервисов имеет большую перспективу;

– на основе проведенных экспериментов по маскированию облачности на разносезонных снимках Sentinel-2 с применением традиционных алгоритмов и метода, основанного на машинном обучении (s2cloudless), доказано, что алгоритм s2cloudless обеспечивает наибольшую точность маскирования (среднее значение *F-меры* 83 %). Более того, использование методов машинного обучения увеличивает точность маскирования облачности по снимкам Sentinel-2 вне зависимости от сезона года и типа облачности на 5–10 %. Применение этого метода

для снимков PlanetScore повышает точность маскирования облачности при наличии снежного покрова. Использование методов машинного обучения при маскировании облачности повышает качество предварительной обработки снимков и в дальнейшем – точность оперативного картографирования нарушений лесного покрова;

– создан новый набор обучающих данных для выявления нарушений лесного покрова с помощью сверточных нейронных сетей, а на его основе проведено более 50 различных экспериментов по распознаванию нарушений лесного покрова с помощью сверточной нейронной сети архитектуры U-net по снимкам Sentinel-2. Установлено, что наиболее информативными признаками для выявления нарушений лесного покрова с помощью сверточных нейронных сетей по одной паре снимков являются спектральные каналы Red, NIR, SWIR и их разности. Это необходимо учитывать при создании моделей распознавания нарушений лесного покрова, а также практических рекомендаций по применению методов машинного обучения в данной области;

– сравнение точности распознавания нарушений лесного покрова на основе сверточной нейронной сети и традиционных методов, основанных на растровой арифметике, показало, что алгоритм на основе сверточных нейронных сетей можно применять при картографировании нарушений лесного покрова, при этом обеспечивается повышение точности распознавания более чем в два раза в сравнении с традиционными методами на контрольном наборе данных. Существенное преимущество сверточных нейронных сетей сохраняется вне зависимости от сезона (для снимков зимнего, летнего и переходных сезонов). Наибольшая точность была достигнута моделью, которая была обучена на снимках летнего периода, наименьшая – на снимках переходного сезона. Преимущества сверточных нейронных сетей наиболее очевидны при детектировании выборочных рубок, которые выделяются как целостные объекты, в то время как с помощью традиционных методов удастся выделить лишь отдельные пиксели с наибольшими изменениями в яркости;

– разработанные модели могут быть использованы в системах мониторинга с различным временным разрешением (еженедельный, ежемесячный, ежеквартальный, ежегодный). Точность распознавания нарушений лесного покрова (на основе показателя *F-меры*) по модели для всех сезонов составила 48 % (с применением традиционных методов 23 %), по модели для летней группы изменений – 45 % (традиционные методы 25 %), по модели для зимней группы изменений – 59 % (традиционные методы 20 %), по модели для переходной группы изменений – 40 % (традиционные методы 21 %). Это позволяет выполнять предварительную обработку снимков для оперативного картографирования нарушений лесного покрова с более высокой точностью в течение всего года;

– разработан прототип картографического веб-сервиса, который может быть легко интегрирован в существующие системы мониторинга, а также стать основой собственной системы. Использование такого сервиса позволит применять разработанные алгоритмы для составления оперативных карт нарушений лесного покрова, которые могут быть полезны в принятии управленческих решений и текущей оценки ситуации.

Полученные результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию в системе поддержки принятия решений в области управления лесным хозяйством, в частности при оценке воздействия негативных явлений на лесной фонд. Помимо этого, результаты могут быть использованы и коммерческими организациями для составления дополнений к различным отчетам и планирования лесозаготовительных мероприятий, полученные алгоритмы могут использоваться в системах автоматического выявления нарушений лесного покрова в таежной лесной зоне.

Перспективы дальнейших исследований в первую очередь связаны с увеличением точности распознавания разных типов нарушений лесного покрова, увеличением точности сегментирования вырубок с неполным изъятием древостоя.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ
ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Тарасов, А. В. Классификация лесной растительности методом нейронных сетей / А. В. Тарасов, А. В. Кедров. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 44–54.

2 Тарасов, А. В. Применение оперативного картографирования при ведении лесохозяйственной деятельности / А. В. Тарасов. – Текст : непосредственный // Географический вестник = Geographical bulletin. – 2019. – № 3 (50). – С. 134 – 145. – doi 10.17072/2079-7877-2019-3-134-145.

3 Тарасов, А. В. Современные методы оперативного картографирования нарушений лесного покрова / А. В. Тарасов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Вып. 3 (25). – С. 201–213. – doi: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-201-213.

4 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660455 Российская Федерация. Программа ForestCalc / А. В. Тарасов, А. В. Кедров ; правообладатель ООО «Малое инновац. предпр. «Центр косм. техн. и услуг» (RU) ; дата поступления 25.07.2017 ; дата регистрации 21.09.2017. – Текст : непосредственный.

5 Шихов, А. Н. Идентификация случаев возникновения смерчей в лесной зоне по многолетним рядам данных дистанционного зондирования Земли / А. Н. Шихов, А. В. Тарасов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 8. – С. 84–94. – doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-84-94.

6 Airborne laser scanning based forest inventory: Comparison of experimental results for the Perm region, Russia and prior results from Finland / Т. Kauranne, S. Ryankov, V. Junttila, A. Tarasov [and others]. – Текст : непосредственный // Forests. – 2017. – Vol. 8, № 3. – P. 1–20. – doi: 10.3390/f8030072.

7 Тарасов, А. В. Оценка точности алгоритмов выделения маски облачности по данным Sentinel-2 и PlanetScope / А. В. Тарасов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 7. – С. 26–38. – doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-26-38.

8 Тарасов, А. В. Распознавание нарушений лесного покрова по спутниковым снимкам Sentinel-2 с помощью сверточных нейронных сетей / А. В. Тарасов, А. Н. Шихов, Т. В. Шабалина. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021 – Т. 18, № 3. – С. 51–64. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-51-64.

9 Шихов, А. Н. Анализ случаев возникновения смерчей в лесной зоне Европейской части России по данным дистанционного зондирования Земли / А. Н. Шихов, А. В. Тарасов. – Текст : непосредственный // Материалы III Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». – Красноярск, 2016. – С. 246–249.

10 Тарасов, А. В. Оценка точности методов маскирования облачности по снимкам Sentinel-2 и PlanetScope / А. В. Тарасов. – Текст : непосредственный // Материалы VI междунар. научн. конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». – Красноярск, 2019. – С. 139–143.

11 Тарасов, А. В. Опыт применения методов машинного обучения для выявления облачности на примере Пермского края / А. В. Тарасов. – Текст : непосредственный // Материалы всероссийской научно-практической конференции с междунар. участием «Цифровая география». – Пермь, 2020. – С. 177–180.

12 Тарасов, А. В. Современные технологии автоматического картографирования облачности / А. В. Тарасов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Национальная науч. конф. с междунар. участием «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 2. – С. 55–61.