

И.В. БЫЧКОВ*, **И.Н. ВЛАДИМИРОВ****, **Г.М. РУЖНИКОВ***, **А.П. СОФРОНОВ****, **Р.К. ФЁДОРОВ***,
А.К. ПОПОВА*, **Ю.В. АВРАМЕНКО***, **С.Л. КРАВЦОВ*****, **Е.В. ЧУРИЛО******

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия,
bychkov@icc.ru, rugnikov@icc.ru, fedorov@icc.ru, chudnenko@icc.ru, avramenko@icc.ru

**Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, garisson@irigs.irk.ru, alesofronov@yandex.ru

***Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси,
220012, Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь, Krautsou_sl@ Rambler.ru

****Институт леса Национальной академии наук Беларуси,
246050, Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь, chev7@tut.by

ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МОНИТОРИНГ ЛЕСОВ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

Проанализированы характерные особенности и выделены проблемы мониторинга лесов Байкальской природной территории. Предложен подход цифровой трансформации мониторинга лесных ресурсов с использованием сервис-ориентированной парадигмы, инфраструктурного подхода, декларативных спецификаций, а также сквозных и Web-технологий сбора и обработки больших объемов пространственно-временных данных. Описана схема цифровой платформы мониторинга леса, основанная на информационно-аналитической геопортальной среде, включающей систему обработки и хранения пространственно-временных данных, каталог базовых и тематических сервисов для учета последствий природного и антропогенного воздействий на леса Байкальской природной территории. Представлен опыт использования методов глубокого обучения на базе нейронных сетей для мониторинга изменений в состоянии лесов. Автоматизированное определение типов земной поверхности проводится по снимкам Sentinel-2. Описан состав классов созданного обучающего набора данных на Байкальской природной территории. Приведен результат алгоритма классификации космоснимка с указанием распознанных классов земной поверхности. Создаваемая цифровая платформа может быть использована для оценки и прогнозирования состояния лесных ресурсов Байкальской природной территории, принятия управленческих решений по эффективному управлению лесами.

Ключевые слова: лес, мониторинг лесных ресурсов, дистанционное зондирование Земли, Sentinel-2, космоснимки, машинное обучение.

I.V. BYCHKOV*, **I.N. VLADIMIROV****, **G.M. RUZHNIKOV***, **A.P. SOFRONOV****, **R.K. FEDOROV***,
A.K. POPOVA*, **Yu.V. AVRAMENKO***, **S.L. KRAVTSOV*****, **E.V. CHURILLO******

*V.M. Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 134, Russia,
bychkov@icc.ru, rugnikov@icc.ru, fedorov@icc.ru, chudnenko@icc.ru, avramenko@icc.ru

**V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, garisson@irigs.irk.ru, alesofronov@yandex.ru

***United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus,
220012, Minsk, ul. Sorganova, 6, Republic of Belarus, Krautsou_sl@ Rambler.ru

****Forest Institute, National Academy of Sciences of Belarus,
246050, Gomel, ul. Proletarskaya, 71, Republic of Belarus, chev7@tut.by

INTRODUCTION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN FOREST MONITORING IN THE BAIKAL NATURAL TERRITORY

The characteristic features are analyzed and the problems of the forest monitoring of the Baikal natural territory (BNT) are highlighted. An approach is proposed for digital transformation of forest resource monitoring using a service-oriented paradigm, an infrastructure approach, declarative specifications as well as end-to-end and Web technologies for collecting and processing

large amounts of spatio-temporal data. A scheme of a digital forest monitoring platform based on an information-analytical geoportal environment is described, including a system for processing and storing spatio-temporal data, a catalog of basic and thematic services for assessing the consequences of natural and anthropogenic impacts on forests of the BNT. The experience of using deep learning methods based on neural networks to monitor changes in the state of forests is presented. Automated determination of the land cover types is carried out on the basis of Sentinel-2 images. The composition of classes of the training data set created for the BNT is described. The result of the satellite image classification with identified land cover classes is given. The digital platform thus created can be used to assess and predict the state of forest resources of the BNT, and to make managerial decisions on effective forest management.

Keywords: forest, forest resource monitoring, Earth remote sensing, Sentinel-2, satellite images, machine learning.

ВВЕДЕНИЕ

Растительный покров и леса как частный пример его организации представляют собой один из самых важных компонентов геосистем, функционально контролирующей развитие и интенсивность ведущих природных процессов. Одновременно он является и прекрасным индикатором состояния окружающей природной среды, так как быстрее всех реагирует на воздействие различных антропогенных факторов. И именно состояние растительности обуславливает экологический и эколого-ресурсный потенциал геосистем и определяет характер социально-экономического развития территории.

Леса постоянно испытывают негативное воздействие, которое вызывают лесные пожары, болезни леса, насекомые-фитофаги, неблагоприятные погодные условия, почвенно-климатические и антропогенные факторы, что может привести к потере биологической устойчивости леса [1].

Мониторинг лесов — система наблюдений, оценки и прогнозирования состояния, охраны, защиты и воспроизводства лесов, повышения их экологических функций. Мониторинг обеспечивает слежение за изменениями состояния лесного фонда, вызванных лесопользованием, природными и техногенными воздействиями на леса, обработку и анализ его основных характеристик, составление прогнозно-аналитических моделей защиты и использования лесных ресурсов, а также устойчивое развитие лесного сектора экономики [2, 3]. Мониторинг трансформации растительного покрова — это важный аспект сбалансированного природопользования территории, позволяющий стимулировать или ограничивать природопользование.

Для цифрового мониторинга лесов разработан ряд систем. Сервис ВЕГА-PRO от Института космических исследований РАН [4] ориентирован на обеспечение специалистов информацией о лесном и сельском хозяйствах. Сервис предоставляет пользователям доступ к регулярно обновляемому архиву спутниковых данных и информационным продуктам — вегетационным индексам, безоблачным композитам, метеоданным и данным о пожарах. Система позволяет строить карты лесных ресурсов и отслеживать их динамику, проводить лесопатологический мониторинг, следить за хозяйственной деятельностью в лесах.

Систему мониторинга восстановления нарушенных лесов создают в Красноярске [5]. Авторы предлагают использовать оценку тепловых аномалий поверхности по временным рядам спутниковых данных (Landsat и Terra/MODIS) для контроля состояния нарушенных территорий. Предложенный подход продлевает лимит дистанционного мониторинга состояния экосистем после пожара или техногенного вмешательства до 20–40 лет с возможностью прогнозировать динамику восстановительных процессов.

В Карелии для наблюдения за лесом используют геоинформационные технологии и данные дистанционного зондирования Земли [6]. Система решает важную задачу — обнаружение и оценку площади незаконных рубок. При обработке космических снимков формируется карта границ вырубок, которые сравниваются с планируемыми границами. Также в систему внедрена модель изменения состояния леса, которая позволяет оценивать будущие запасы леса.

Национальная система мониторинга динамики лесных ресурсов создана в Австрии [7]. Она основана на анализе временных рядов спутниковых снимков Sentinel-2 совместно с фенологическими моделями. На выходе система готовит карты лесов с выявленными нарушениями — повреждениями деревьев насекомыми.

Спутниковые данные используют для исследования изменений в лесных ресурсах в национальных парках Чехии и Словакии [8]. Система высчитывает набор различных вегетационных индексов для различения нарушенных и ненарушенных областей, а также фаз восстановления лесной растительности. Авторы доказали, что больше полезной информации дают вегетационные индексы NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDMI (Normalized Difference Moisture Index) и ортогональный

индекс TCW (Tasseled Cap Wetness), в то время как ортогональный индекс TCG (Tasseled Cap Greenness) оказался мало полезен. Систему используют для обнаружения наиболее актуальных проблем в лесах Центральной Европы — ветровалов и поражения насекомыми.

В рассмотренных системах мониторинга лесной растительности изменения структуры насаждений отслеживаются на основании анализа данных космической съемки и вегетационных индексов. Однако при подобной работе не всегда удается достаточно точно разделять классы насаждений по лесообразующим породам, имеющим близкие спектральные характеристики. Также исследуемая территория обладает своими физико-географическими особенностями, для учета которых необходимо формировать собственную обучающую выборку. При этом формируемая методика носит межтерриториальный характер и может реализовываться в Республике Беларусь, в рамках научной программы Союзного государства, при проведении совместных исследований с Институтом леса НАН Беларуси. Следует учитывать, что мониторинг лесов республики проводится в соответствии с Лесным кодексом Республики Беларусь, а также обладает аналогичными экологическими проблемами.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Байкальская природная территория (БПТ) — территория, в состав которой входят оз. Байкал, водоохранная зона, прилегающая к озеру, его водосборная площадь в пределах территории Российской Федерации, особо охраняемые природные территории у Байкала, а также прилегающая к озеру территория шириной до 200 км на запад и северо-запад от него [9]. БПТ расположена на площадях трех субъектов Российской Федерации: 28,5 % в Иркутской области, 57,1 — в Республике Бурятия, 14,4 % — в Забайкальском крае. Площадь БПТ равна 386 тыс. км², что превышает суммарную площадь всех заповедников и национальных парков России (317 тыс. км²).

На БПТ расположена сеть особо охраняемых природных территорий (ООПТ), представленная пятью заповедниками, четырьмя национальными парками, 21 заказником, одним природным парком, 71 памятником природы, одним ботаническим садом. Уникальные ландшафты БПТ находятся под защитой «Конвенции об охране всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО», утвержденной в 1996 г., требующей сохранять территорию в неизменном естественном виде [10]. БПТ налагает определенные ограничения на хозяйственную деятельность, ужесточает режим использования земель и тем самым обеспечивает функционирование уникальной природной системы оз. Байкал.

На БПТ мониторинг лесов ведется по ведомственному принципу: департаментами Федерального агентства лесного хозяйства РФ по СФО, ДВО; Министерством лесного комплекса Иркутской области; Республиканским агентством лесного хозяйства Республики Бурятия; Министерством природных ресурсов Забайкальского края и их лесничествами; филиалами ФБУ «Российский центр защиты леса» в Иркутской области, Республике Бурятия, Забайкальском крае; подразделениями ФБУ «Авиалесоохрана» — «Иркутской авиабазой», «Забайкальской базой авиационной охраны лесов», «Читинской базой авиационной охраны лесов»; Главными управлениями МЧС России по Иркутской области, Республике Бурятия, Забайкальскому краю; природоохранными прокуратурами; отраслевыми учреждениями, бизнесом. Научный мониторинг лесов БПТ поддерживают институты Сибирского отделения РАН и высшие учебные заведения [11].

Экологические проблемы БПТ, связанные с лесными ресурсами, включают:

- уменьшение лесопокрытых площадей из-за пожаров, нелегальных рубок и лесопатологий, насекомых-фитофагов и др.;
- рост эпидемиологического поражения хвойных пород;
- неблагоприятные почвенно-климатические и антропогенные факторы;
- отсутствие последовательной системы лесовосстановления и ухода за лесами [12].

Эффективность мониторинга лесов БПТ зависит от уровня, полноты и точности наблюдений за состоянием и динамикой древостоя, а также от комплексности использования зонально-типологического подхода [13].

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ РЕСУРСОВ БПТ

Отсутствие единой информационно-аналитической системы мониторинга лесных ресурсов БПТ, системы хранения и обработки данных о лесах в унифицированных форматах, ограниченность доступа к данным мониторинга затрудняют принятие управленческих решений и проведение научных исследований в этой области. Территориальная распределенность и множественность участников

мониторинга лесов БПТ, слабое использование современных дистанционных методов, ведомственный характер нескоординированных процессов получения и обработки данных обуславливают низкую актуализацию официальной лесоустроительной информации [14].

Проблему организации мониторинга лесных ресурсов можно решить с помощью его цифровой трансформации, которая позволит создать условия для устойчивого управления лесами БПТ и соблюдения требований рационального использования лесов, их воспроизводства, сохранения ресурсного, рекреационного, экологического потенциала и биологического разнообразия.

Цифровая трансформация обуславливает совершенствование цифровых информационных технологий, увеличение мощностей вычислительных кластеров, создание сетей 4G и 5G, интернета вещей (IoT). Полный перевод мониторинга лесов БПТ на новый технологический уклад предполагает:

- интеграцию сенсоров в оборудование, замену физических или аналоговых ресурсов цифровыми данными, также переход на цифровой способ передачи данных мониторинга леса;
- автоматизацию сбора разноформатных пространственно-временных данных мониторинга в распределенную облачную сеть центров (ЦОД) обработки междисциплинарных пространственно-временных данных цифрового мониторинга лесов БПТ;
- внедрение современных цифровых технологий: «сквозных», больших данных (Big Data), искусственного интеллекта, когнитивного анализа данных и прогнозирования рисков и т. д.;
- интеграцию участниками схем и методов на основе развития и внедрения инфраструктуры пространственных данных, сервис-ориентированной среды, сквозных технологий, WPS-сервисов (Web Processing Service) и т. д.;
- разработку оригинальных математических, информационных моделей «цифровых двойников»;
- создание тематических WPS-сервисов выявления и оценки изменений состояния растительного покрова по временным сериям данных дистанционных наблюдений под воздействием деструктивных факторов (включая пожары, вырубку, вспышки массового размножения насекомых, техногенные загрязнения, аномальные метеорологические явления);
- организацию эффективного использования пространственно-временных тематических данных мониторинга лесов БПТ и планирования WPS-сервисов (базовых и тематических) между участниками цифровой платформы (ЦП);
- информационную доступность результатов научных исследований для управления лесными ресурсами БПТ.

В перспективе цифровизация мониторинга лесов БПТ должна обеспечить открытый информационно-вычислительный и телекоммуникационный обмен участниками мониторинга тематическими данными, сервисами их обработки, моделями, цифровыми инструментами и услугами.

Основой цифрового мониторинга лесов БПТ становится ЦП [15]. Это среда накопления, обмена и управления данными в структурированном виде, а также вызова бизнес-функций с подключенными к ней через технологические интерфейсы информационными системами. Функциональность ЦП определяется ее предметной направленностью (рис. 1).

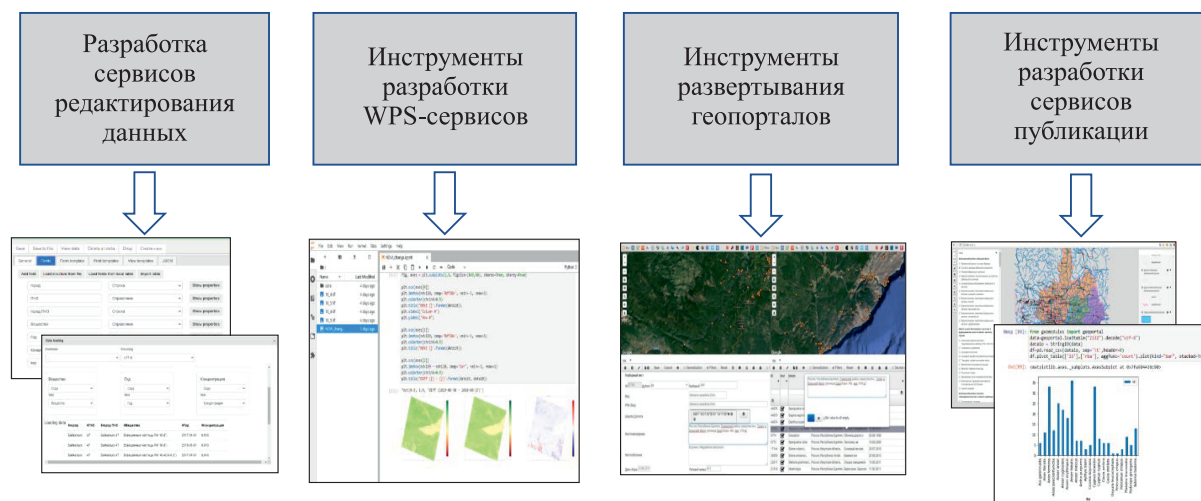


Рис. 1. Схема цифровой платформы мониторинга леса Байкальской природной территории.

На этапе формирования ЦП мониторинга лесов БПТ акцент сделан на:

- реализации геопортальной информационно-аналитической среды, использующей базы пространственно-временных данных мониторинга леса;
- создании набора взаимосвязанных цифровых информационных ресурсов, программно-реализованных в виде WPS-сервисов обработки данных мониторинга лесов БПТ;
- разработке системы хранения данных мониторинга, а также средств эффективного доступа к этой информации;
- создании прототипа подсистемы управления сервисами мониторинга лесов БПТ;
- разработке инфраструктурных компонентов представления, отображения пространственно-временных данных мониторинга лесов БПТ в виде таблиц, диаграмм, карт;
- развитии программно-аппаратного обеспечения ЦОД.

Программное обеспечение ЦП мониторинга леса поддерживает доступ участников к разработке и отладке прикладных информационных и программно-аппаратных средств мониторинга путем предоставления стандартных функций, инструментальных сервисов обработки пространственно-временных данных и их интерфейсов. Ввиду многообразия данных мониторинга леса БПТ и сервисов их обработки на основе инструментального программного обеспечения могут создаваться тематические, интегрирующие данные и сервисы заданной предметной области [16].

Таким образом, в рамках концепции цифровой трансформации мониторинга леса БПТ формируется ЦП моделирования, взаимодействия с данными сенсоров, создания программных интерфейсов и интерфейсов пользователя, хранения данных моделирования (большие данные) и модификации существующих информационных моделей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В современных исследованиях по оперативному мониторингу, оценке и прогнозированию состояния лесных ресурсов активно используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [17, 18], которые различаются по пространственному, спектральному и временному разрешениям. Широкое разнообразие доступных наборов данных (например, аэрофотоснимков, тепловизионных изображений, гиперспектральных изображений, снимков с радаров и лидаров) сделало возможной разработку новых методов цифровой классификации образов. Для исследований лесов БПТ авторами были выбраны мультиспектральные космоснимки со спутников Sentinel-2, которые имеют самое высокое разрешение из свободно распространяемых — 10 м, что позволяет различать разные типы поверхности (вода, лес, дороги, здания), отделять породы деревьев (хвойные или лиственные) и отслеживать изменения лесных площадей (пожары, вырубки, усыхание из-за болезней и насекомых). Съемка территорий спутниками Sentinel-2 проводится в среднем каждые 5 дней. Космоснимки состоят из 13 спектральных каналов, четыре из которых с разрешением 10 м, остальные — 20 и 60 м. Космоснимки для мониторинга предварительно скачиваются в ЦОД из архива USGS [19]. Учитывая разрешение и периодичность съемки, данные Sentinel-2 являются наиболее подходящими для организации мониторинга лесных ресурсов БПТ.

В рамках цифровой трансформации мониторинга лесных ресурсов проводится классификация данных ДЗЗ БПТ — автоматизированное определение типов земной поверхности на снимках. Для семантической сегментации спутниковых изображений используют различные алгоритмы машинного обучения — максимального подобия, кластеризации, метод k -ближайших соседей (k -nearest neighbour), случайный лес (RF), методы опорных векторов (SVM) и нейронные сети. Лучшие результаты в современных исследованиях показывает глубокое обучение на основе нейронных сетей, в частности, сверточные нейронные сети (CNN), структура которых позволяет изучать предметную область путем объединения слоев свертки, объединения и полносвязных слоев [20].

Глубокая нейронная сеть — это многослойная модель, которая может строить сложные нелинейные отношения между входными параметрами. Глубокое обучение проводит высокоуровневую абстракцию данных с использованием иерархической архитектуры, состоящей из нескольких взаимосвязанных слоев с искусственными нейронами. Способность CNN кодировать спектральную и пространственную информацию изображений ДЗЗ с использованием контекстной информации о соседстве пикселей приводит к существенному повышению эффективности классификации. Кроме того, свойства локальной связи и совместного использования параметров CNN значительно сокращают количество характеристик, которые необходимо было бы изучить для многомерных изображений при использовании стандартной нейронной сети, тем самым уменьшая усилия по обработке [21].

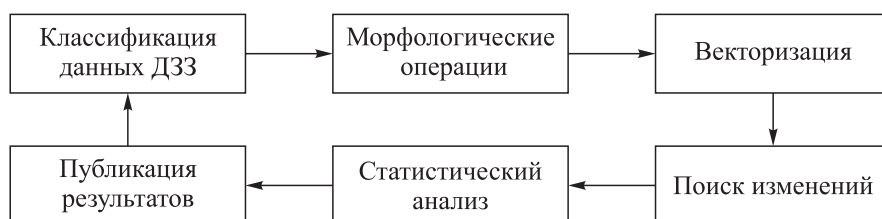


Рис. 2. Жизненный цикл мониторинга лесных ресурсов.

Для обучения нейронной сети потребовалось сформировать обучающий набор данных на БПТ. Природные особенности ландшафтов изучаемой территории обусловили состав обучающей выборки — большая часть площадей занята горной тайгой, а в средней части преобладает лесостепной ландшафт. Лесообразующие породы включают в себя хвойные и лиственные деревья. В высокогорном поясе и поймах рек распространены кустарниковые заросли, поэтому в обучающей выборке лесные ресурсы представлены пятью классами: хвойный, лиственный и смешанный лес, редколесье, кустарники. На БПТ проводятся активные рубки леса, для их мониторинга к набору данных добавлен класс «Вырубки».

Значимую часть БПТ занимают водные объекты и горные системы, для обработки которых добавлены классы «Голая скала» и «Вода». Травянистая растительность представлена классами «Сельскохозяйственные культуры» и «Пастбище». Для оценки антропогенного влияния на территорию добавлен класс «Жилая зона».

Результаты классификации представлены в виде набора растровых изображений за период с мая по октябрь каждого года. Проводится последующая обработка результатов классификации для обобщения и представления в разрезе существующей квартальной сети и лесхозов. Определяется динамика изменения состава лесных ресурсов исследуемой территории. При этом анализ проводится последовательно, образуя цикл, в котором каждая итерация использует результаты предыдущих. На текущий момент итерация проводит анализ снимков за год [22] (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования были разработаны следующие шаги мониторинга и анализа лесных ресурсов:

- классификация данных — применяется нейронная сеть ResNet-50 (Residual Neural Network — остаточная сеть);
- морфологические операции — используются операции наращивания, эрозии, замыкания и размывания для удаления мелких объектов, сглаживания границ;
- векторизация — производится с помощью метода Polygonize библиотеки GDAL (Geospatial Data Abstraction Library — библиотека абстракции геопространственных данных), в результате получаем полигональное представление результатов классификации; применение морфологических операций на предыдущем шаге позволяет значительно уменьшить объем получаемых векторных данных;
- статистический анализ — применяется метод Intersection для создания векторных объектов, представляющих собой алгебраическое пересечение объектов квартальной сети и полигонов классификации; затем для всех полученных пересечений в рамках квартальной сети производится подсчет площадей и сохранение в семантике объекта идентификатора объекта квартальной сети;
- поиск изменений — выполняется сравнение с предыдущими результатами, вычисляется разница по классам в разрезе квартальной сети;
- публикация результатов — формируется векторная карта в рамках геопортала (рис. 3).

Изменение и восстановление лесной растительности — длительный процесс, на который наложен ряд естественных ограничений. Например, временные ограничения смены классов: часто после вырубки или на залежах восстановление хвойных лесов требует развития мелколиственных насаждений, а не просто восстановления сразу хвойного древостоя. Учет этих ограничений позволяет повысить качество классификации. На текущий момент ведется работа по улучшению качества классификации данных Sentinel-2 и ускорению обработки данных. С результатами проведенной классификации можно ознакомиться на сайте «Каталога снимков ДЗЗ» геопортала Института динамики систем и теории

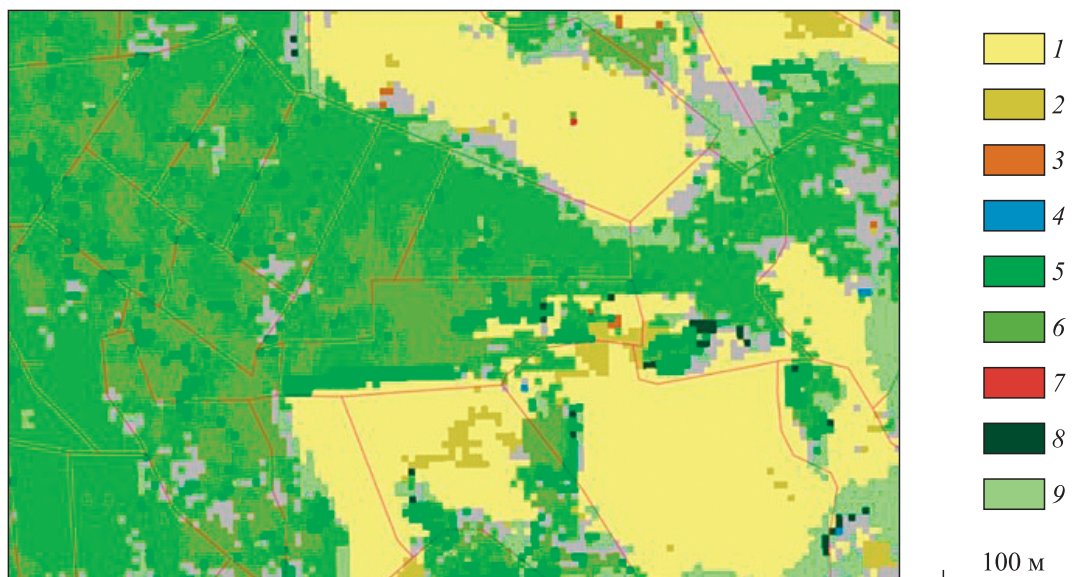


Рис. 3. Результат классификации снимка на Иркутскую область с наложенной кварталной сетью.

Классы: 1 — поля, 2 — пастбища, 3 — жилые массивы, 4 — вода, 5 — смешанный лес, 6 — редколесье, 7 — вырубki, 8 — хвойный лес, 9 — кустарники.

управления им. В.М. Матросова СО РАН [23]. В каталоге в открытом доступе представлены космические снимки Иркутской области и Республики Бурятия с 2016 г. по настоящее время. Пользователи могут искать их по местоположению, дате, облачности, просматривать и скачивать исходные снимки и результаты классификации в виде изображений.

Создание информационных моделей с использованием нейронных сетей представляет собой перспективное направление цифровой трансформации мониторинга лесных ресурсов Байкальской природной территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информационно-аналитическая среда, реализованная в рамках цифровой платформы, обеспечивает оперативный сбор, хранение в ЦОД и параллельную обработку большого объема пространственно-временных данных мониторинга лесных территорий БПТ, а также возможность онлайн-доступа к данным, каталогам, сервисам и тематическим информационным системам.

Классификация спутниковых снимков БПТ нейронной сетью на основе созданной обучающей выборки показала неплохие результаты, которые могут быть использованы для фиксации изменений лесных площадей в виде карт. В дальнейшем планируется улучшать качество классификации для более точного разделения категорий, используя для этого модель перехода между классами. Это поможет выявлять лесные площади, поврежденные пожарами и насекомыми, вырубленные, усыхающие, попавшие под иное негативное воздействие, даже на труднодоступных для наземных наблюдений территориях.

Разрабатываемые авторами методы, алгоритмы и программное обеспечение позволят создать соответствующие инструменты мониторинга состояния лесных насаждений Байкальской природной территории и Республики Беларусь, а также обеспечить более надежный контроль за состоянием древостоев по сравнению с существующими методами.

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Владимиров И.Н.** Экологический потенциал геосистем Байкальской Сибири как основа оптимизации природопользования в регионе // География и природ. ресурсы. — 2020. — Т. 41, № 5 (164). — С. 6–13.
2. **Приказ** Минприроды России от 19.02.2015 № 59 «Об утверждении порядка осуществления государственного мониторинга воспроизводства лесов» [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/420259469> (дата обращения 28.01.2022).
3. **Приказ** Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 05.04.2017 № 156 «Об утверждении Порядка осуществления государственного лесопатологического мониторинга» [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/456058836> (дата обращения 28.01.2022).
4. **Луян Е.А., Баргалева С.А., Толпин В.А., Жарко В.О., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю.** Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2014. — Т. 11, № 3. — С. 215–232.
5. **Yakimov N.D., Ponomarev E.I., Ponomareva T.V.** Satellite monitoring of the state and dynamics of disturbed natural and technogenic landscapes in Siberia // CEUR Workshop Proceedings. — 2021. — Vol. 3006. — P. 585–593.
6. **Васильев В.Н., Марков О.Б., Щеголева Л.В., Воронов Р.В., Тесля И.В.** Мониторинг и прогнозирование состояния леса с использованием цепи Маркова // Resources and Technology. — 2015. — Т. 12, № 1. — С. 10–25.
7. **Löw M., Koukal T.** Phenology modelling and forest disturbance mapping with Sentinel-2 time series in Austria // Remote Sensing. — 2020. — Vol. 12, N 24. — P. 1–27.
8. **Lastovicka J., Svec P., Paluba D., Kobluk N., Svoboda J., Hladky R., Stych P.** Sentinel-2 data in an evaluation of the impact of the disturbances on forest vegetation // Remote Sensing. — 2020. — Vol. 12, N 1914. — P. 1–26.
9. **Федеральный закон** «Об охране озера Байкал» № 94-ФЗ от 1 мая 1999 г. // Собрание законодательства Российской Федерации. — 1999. — № 18, ст. 2220. — С. 120.
10. **Конвенция** об охране всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО [Электронный ресурс]. — <http://whc.unesco.org/archive/convention-ru.pdf> (дата обращения 28.01.2022).
11. **Попова А.К., Cherkasin E.A., Vladimirov I.N.** Forest resources of the Baikal Region: Vegetation dynamics under anthropogenic use // Information Technologies in the Research of Biodiversity. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. — Cham: Springer, 2019. — P. 96–106.
12. **Государственный доклад** «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2017 году». — Иркутск: АНО «КЦ Эксперт», 2018. — 340 с.
13. **Belov A.V., Vladimirov I.N., Sokolova L.P.** Cartographic assessment of the present status of vegetation in Prebaikalia for water use optimization // Geography and Natural Resources. — 2016. — Vol. 37. — P. 129–134.
14. **Байкал: природа и люди: энциклопедический справочник** / Отв. ред. А.К. Тулохонов. — Улан-Удэ: ЭКОС, изд-во БНЦ СО РАН, 2009. — 608 с.
15. **Развитие** цифровой экономики в России. Программа до 2035 года [Электронный ресурс]. — <http://innclub.info/wp-content/uploads/2017/05/strategy.pdf> (дата обращения 20.01.2022).
16. **Buchkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K.** A platform approach to the organization of digital forest monitoring of the Baikal natural territory // IOP Conf. Ser.: Earth Environ [Электронный ресурс]. — <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/611/1/012056> (дата обращения 20.01.2022).
17. **Puletti N., Chianucci F., Castaldi C.** Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments // Ann Silvicult. — 2018. — N 42 (1). — P. 32–38.
18. **Zhang W., Tang P., Zhao L.** Fast and accurate land cover classification on medium resolution remote sensing images using segmentation models // Intern. Journ. of Remote Sensing. — 2021. — Vol. 42 (9). — P. 3277–3301.
19. **United States Geological Survey** [Электронный ресурс]. — <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 27.09.2022).
20. **Carranza-García M., García-Gutiérrez J., Riquelme J.C.** A framework for evaluating land use and land cover classification using convolutional neural networks // Remote Sensing. — 2019. — N 11 (3). — P. 1–15.
21. **Alhassan V., Henry C., Ramanna S., Storie C.** A deep learning framework for land-use/land-cover mapping and analysis using multispectral satellite imagery // Neural Computing and Applications. — 2020. — N 32 (12). — P. 8529–8544.
22. **Бычков И.В., Ружников Г.М., Фёдоров Р.К., Попова А.К., Авраменко Ю.В.** Классификация космоснимков Sentinel-2 Байкальской природной территории // Компьютерная оптика. — 2022. — Т. 46, № 1. — С. 90–96.
23. **Каталог** снимков ДЗЗ геопортала ИДСТУ СО РАН [Электронный ресурс]. — <https://geos.icc.ru/remotesensing> (дата обращения 27.09.2022).

Поступила в редакцию 10.02.2022

После доработки 22.06.2022

Принята к публикации 01.11.2022