

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

GEOINFORMATION
MODELING

ВЫПУСК 2(2)
2025



АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПО РАЗВИТИЮ ПРИРОДНОГО
ПОТЕНЦИАЛА ТЕРРИТОРИЙ «УНИКАЛЬНЫЕ ЛАНДШАФТЫ»

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Том 2, Выпуск 2, 2025

Санкт-Петербург

2025

Рекомендовано к изданию Редакционным советом

Редакционный совет

- М. Р. Вагизов*, доктор технических наук, доцент (главный редактор),
Н. В. Меламед, кандидат технических наук, доцент, (зам. гл. редактора)
Е. П. Истомин, доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник науки и высоких технологий РФ
Е. Н. Черемисина, доктор технических наук, профессор
С. П. Присяжнюк, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РФ
А. С. Алексеев, доктор географических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ
А. В. Матерухин, доктор технических наук, профессор
В. А. Григорьев, доктор технических наук, профессор, президент Академии инженерных наук имени А. М. Прохорова
Х. Г. Мусин, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, Заслуженный лесовод РФ
А. М. Заяц, кандидат технических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы Санкт-Петербурга
Д. А. Ковалёв, кандидат технических наук, доцент
А. С. Дурова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент.

Учредитель и издатель

АНО РППТ «Уникальные ландшафты»
г. Санкт-Петербург, ул. Стойкости, д. 37, литера А. пом. 56
geogml@bk.ru <https://gmlgeo.ru>

Геоинформационное моделирование : научный журнал. Т. 2. Вып. 2 / отв. ред. М. Р. Вагизов. — СПб. : Проспект Науки, 2025. — 80 с.



Приветствие главного редактора

Уважаемые читатели, в данном выпуске журнала вы можете ознакомиться с научными публикациями наших авторов. Немалое количество статей в количестве 4, размещены в секции Геоэкологии, где основной упор наших исследователей сосредоточен в области анализа проблем экологического развития и решения антропогенного воздействия на окружающую среду. Достаточно важно отметить, что одними из начинающих исследователей кто прислал нам материалы, являются студенты. В этой связи хочется особое внимание выразить начинающим учёным, поскольку преемственность поколений в образовательных учреждениях достигается не только за счёт образовательной деятельности, но и большой вклад вносит организация научной работы, которая, как правило, стоит на опоре изначально образования. Редакция нашего журнала желает всем успехов на пути научной деятельности и ждёт ваши материалы в следующих выпусках.

*С уважением Главный редактор журнала
«**Геоинформационное моделирование**»
доктор технических наук, доцент
Вагизов Марсель Равильевич.*



СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ

Валеев В. О. Обзор геоинформационных технологий в лесопромышленном комплексе: современные возможности и перспективы 5

Гоманов Д. Е., Иванов В. Г., Кузин П.И. Мониторинг изменений лесных объектов по разновременным фотограмметрическим изображениям БАС 14

РАЗДЕЛ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СТАТИСТИКА

Челпанов В. С., Витлев К. В. Разработка интерактивного пользовательского интерфейса для интеллектуальной геоинформационной системы: опыт и перспективы (часть 2)..... 22

Хабаров С. П., Вагизов М. Р. Анализ взаимодействия http/3 и quic с использованием python-клиента и wireshark..... 29

Мартын К.А., Мартын И. А. Сравнительный анализ производительности различных серий модели Yolo v8 для классификации объектов лесного массива 39

РАЗДЕЛ ГЕОЭКОЛОГИЯ

Данилова Е. В. Гидропонные установки и их влияние на сельское хозяйство (часть 1)..... 46

Хуснутдинов И. И., Диммухаметова А. В., Хафизов А. А. Методы создания дубовых культур и их роль в формировании защитных лесных насаждений.... 56

Кузнецов Е.В., Демин И. Ю., Леонов Е.Л., Сазанов В.К., Вагизов М. Р. К вопросу о необходимости создания условий оптимизации водного баланса речной сети путём восстановления гидрологического режима малых рек с помощью технологий лесомелиорации и геоинформационного моделирования..... 64

Бобровская Р. М. Динамика и обезлесивание лесов юго-восточной азии по данным дистанционного зондирования земли 72

РАЗДЕЛ ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ

Section Geoinformatics, Cartography

УДК 004.9:630

Валеев В. О.

ОБЗОР ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ: СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Валеев Всеволод Олегович

аспирант 1 курса ИСИТ

кафедра Информационных систем и технологий,

Институт леса и природопользования

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова

Санкт-Петербург

E-mail: vsevolod.valeev@gmail.com

Аннотация. *Статья содержит комплексный анализ использования геоинформационных технологий в лесопромышленном комплексе в современном мире. Рассматриваются исторические предпосылки их внедрения, ключевые функциональные возможности, технологические платформы и программные решения. Уделяется особое внимание анализу следующих аспектов: цифровой картографии при решении задач лесоустройства, мониторингу лесных экосистем, дистанционному зондированию, системе глобального позиционирования, планирование лесозаготовок и логистической инфраструктуры лесопромышленного комплекса. Современные тренды и тенденции, описанные в международных и отечественных научных публикациях, позволяют увеличить рентабельность лесопромышленного комплекса, с помощью интеграции геоинформационных технологий.*

Ключевые слова: *геоинформационные системы, лесопромышленный комплекс, дистанционное зондирование, лесоустройство, мониторинг лесов, цифровизация лесного хозяйства, ГЛОНАСС/GPS, устойчивое лесопользование.*

REVIEW OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES IN THE FOREST INDUSTRY: CURRENT CAPABILITIES AND PROSPECTS

Annotation. *The article provides a comprehensive analysis of the use of geoinformation technologies in the timber industry in the modern world. It examines the historical background of their implementation, key functionalities, technological platforms, and software solutions. Special attention is given to the analysis of the following aspects: digital cartography in solving forest management tasks, forest density monitoring, remote sensing, global positioning systems, and the planning of logging operations and the logistics infrastructure of the timber industry. The current trends and developments described in international and domestic scientific publications offer opportunities to increase the profitability of the timber industry through the integration of geoinformation technologies.*

Keywords: *Geographic Information Systems, Forest Industry Complex, Earth Remote Sensing, forest management, forest monitoring, digitalization of forestry, GLONASS/GPS, sustainable forest management.*

Введение. Автоматизация лесопромышленного комплекса является ключевым фактором конкурентоспособности и увеличению рентабельности в XXI веке [1, с. 32]. На всех этапах лесного цикла (от инвентаризации ресурсов до логистики готовой продукции) использование геоинформационных технологий обеспечивает анализ пространственных данных для принятия оптимальных решений. Ограниченная доступность логистических ресурсов лесопромышленного комплекса создает потребность в применении инновационных решений для оптимизации производства [2].

Исторически использование ГИС в лесном хозяйстве (картографических методов и аэрофотосъемки), подразумевает внедрение инновационных технологий для получения качественных данных. Революционный проыв произошел при создании спутниковой навигации (ГЛОНАСС/GPS), появлении возможности дистанционного зондирования в различных спектральных диапазонах (оптическом, радиолокационном, лидарном) и мощных программных комплексов для обработки пространственных данных [3].

Современные технологии обладают обширным универсальным функционалом, предоставляя инструменты для:

- Цифрового лесоустройства и таксации;
- Мониторинга состояния лесов (включая выявление повреждений от пожаров, вредителей, болезней);
- Оптимизации планирования транспортной инфраструктуры;
- Контроля за лесопользованием и выявления незаконных рубок (НЛР);
- Оценки последствий природных и антропогенных воздействий;
- Моделирования роста древостоев и планирования лесовосстановления.

Целью данной статьи является систематизация знаний о современных геоинформационных технологиях, применяемых в ЛПК, анализ их функциональных возможностей, оценка эффективности и выявление ключевых направлений развития.

Исторические предпосылки и технологическая эволюция геоинформационных систем в лесопромышленном комплексе. Формирование и эволюция геоинформационных систем в лесном хозяйстве представляет собой динамичный процесс, неразрывно связанный с общим технологическим прогрессом в вычислительной технике, картографии и дистанционном зондировании. Эта хронология отражает не только техническую трансформацию, а также формирует решения отрасли на растущие экологические, экономические и управленческие вызовы.

Доцифровая эпоха (до 1970-х гг.) характеризовалась полным доминированием аналоговых методов. Основу информационного обеспечения составляли бумажные топографические карты, лесоустроительные планшеты и аэрофотоснимки, которые интерпретировались визуально с помощью стереоскопов. Наземная таксация проводилась исключительно ручными методами с использованием мерной вилки, буссоли и курвиметра, что требовало огромных трудозатрат и времени. Пространственный анализ был примитивен – расчеты площадей проводились планиметром или палеткой, а построение картограмм запасов или типов леса осуществлялось вручную. Оперативность получения информации о состоянии лесного фонда была крайне низкой, а точность – ограниченной, особенно в труднодоступных районах. Управленческие решения основывались на данных, которые могли устаревать еще до завершения их обработки. Данный период заложил фундаментальные принципы лесоустройства и картографирования, создал обширные архивы аэрофотосъемки, ставшие позднее бесценным материалом для анализа долгосрочной динамики лесов.

Зарождение цифровых систем (1970-е – 1990-е гг.) ознаменовалось революционным переходом к компьютерной обработке данных. Появление первых ЭВМ и специализированного программного обеспечения для работы с графикой (например, ранние версии GRASS GIS, системы на базе AutoCAD) позволило начать цифровую трансформацию бумажных карт и создание первых векторных слоев границ лесничеств, кварталов и выделов. Автоматизировались базовые расчеты площадей контуров и объемов древесины по таксационным описаниям, что существенно повысило скорость и точность. Ключевым событием стало, начало оперативного использования данных первых гражданских спутников дистанционного зондирования, прежде всего, американской программы Landsat. Мультиспектральные снимки среднего разрешения предоставили беспрецедентные возможности для мониторинга крупномасштабных изменений лесного покрова – выявления масштабных вырубок, ветровалов на огромных территориях. Обработка этих данных требовала дорогостоящего оборудования и высококвалифицированных специалистов, что ограничивало их широкое применение в повседневной практике лесных хозяйств. Этот этап заложил технологические основы, доказал принципиальную возможность цифрового представления и анализа пространственной информации о лесах, но системы оставались дорогими, сложными в эксплуатации и доступными лишь крупным научным центрам или государственным структурам.

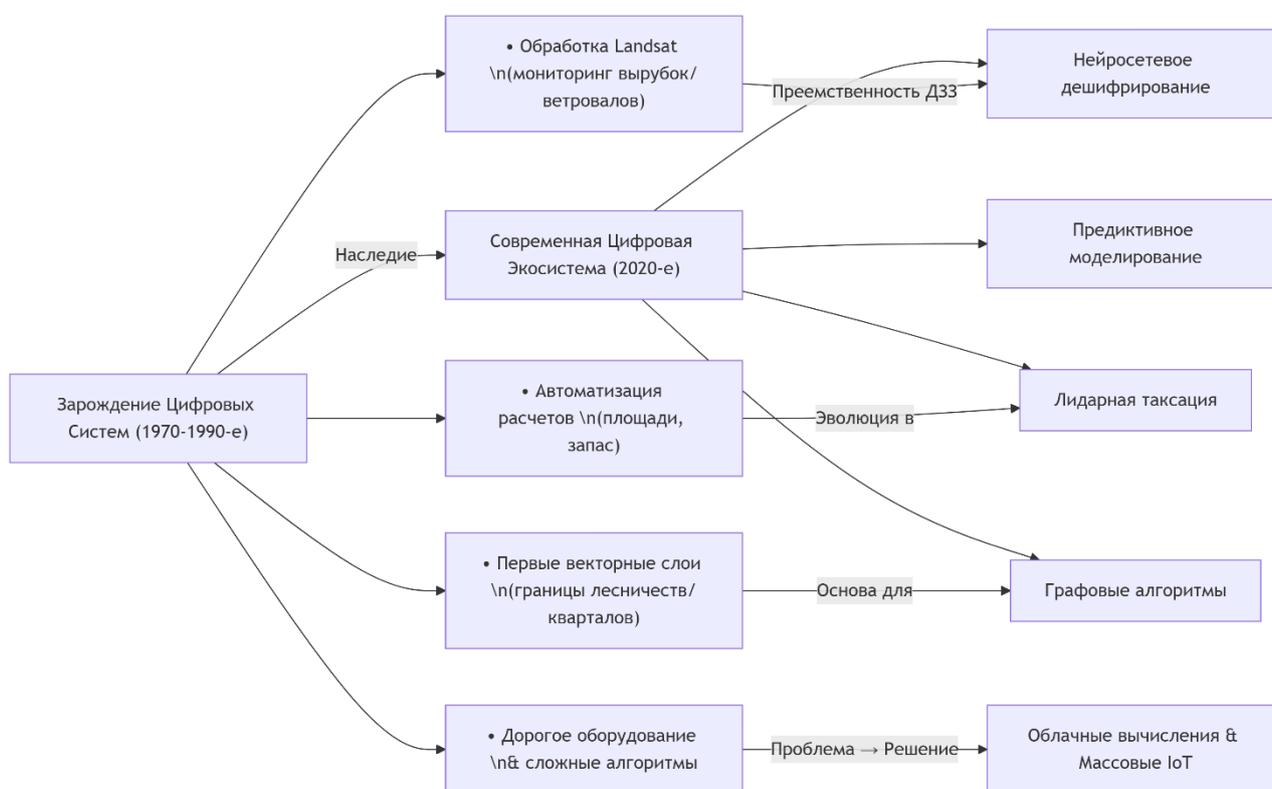


Рисунок 1. Развитие цифровых систем

Figure 1. Development digital systems

Этап активного развития и специализации (2000-е – 2010-е гг.) стал временем массового проникновения технологий ГИС в практику лесного хозяйства [8]. Этому способствовала резко возросшая доступность и мощность персональных компьютеров, а также появление глобальных навигационных спутниковых систем – Российской ГЛОНАСС. Точное позиционирование стало рутинной операцией: ГНСС-приемники использовались для географической привязки таксационных выделов на местности, навигации лесозаготовительной техники и контроля за соблюдением границ лесосек. Параллельно произошла революция в дистанционном зондировании: появились коммерческие спутники высокого и сверхвысокого разрешения, предоставившие детализацию,

сопоставимую с аэрофотосъемкой. Европейская программа Sentinel начала предоставлять бесплатные многоспектральные снимки среднего разрешения с высокой периодичностью съемки. Широкое распространение получила лазерная съемка, позволившая с высокой точностью измерять высоту древостоя и создавать цифровые модели рельефа и поверхности под покровом леса. На рынке программного обеспечения сформировались мощные и удобные настольные ГИС-платформы: коммерческий ArcGIS (ESRI) и открытый QGIS, ставшие отраслевыми стандартами. На их базе начали развиваться специализированные модули и надстройки для лесного хозяйства (например, "ЛесГИС" в России, ArcGIS Forestry, Trimble Forestry), предлагавшие инструменты для таксации по снимкам, проектирования лесосек, прокладки лесовозных дорог, расчета ликвидных запасов и моделирования рубок. Важнейшим достижением стала интеграция ГИС с системами управления базами данных (СУБД), что позволило создавать комплексные информационные системы лесного хозяйства, объединяющие пространственные данные, таксационные описания, хозяйственные планы и нормативно-справочную информацию. Это значительно повысило эффективность управления лесным фондом и планирования деятельности лесопользователей.

Этап активного перехода от изолированных карт к интегрированным платформам (2010-2020). Начало десятилетия характеризовалось использованием ГИС преимущественно как инструмента для создания электронных карт лесного фонда и планирования рубок, часто в виде локальных десктоп-решений (ArcGIS, QGIS, "Панорама"), слабо интегрированных с другими бизнес-системами лесопредприятий. Резкое удешевление и увеличение доступности данных дистанционного зондирования, особенно со спутников среднего и высокого разрешения (Landsat, Sentinel-2, WorldView), стало ключевым драйвером, позволившим внедрить регулярный мониторинг состояния лесов и детектирование изменений (рубок, ветровалов, пожаров) на больших территориях. Активное развитие облачных платформ (ArcGIS Online, QGIS Cloud, специализированные решения) и веб-ГИС кардинально упростило доступ к пространственным данным для разных подразделений компаний, обеспечило централизованное хранение и актуальность информации, снизив барьеры для использования ГИС неспециалистами. Серьезным сдвигом стала насущная потребность и последующая глубокая интеграция ГИС с корпоративными ERP-системами (SAP, 1С:ERP), что позволило автоматизировать потоки данных о местоположении лесосек, объемах заготовки, маршрутах техники и привязывать эти пространственные данные к бизнес-процессам планирования, учета и экономических расчетов. Широкое распространение мощных смартфонов и планшетов с GPS и специализированного ПО для полевых бригад (Collector for ArcGIS, QField, мобильные модули 1С) обеспечило оперативный сбор таксационных данных, фиксацию нарушений и передачу геопривязанной информации прямо с делянки в центральные системы. Внедрение воздушного (БПЛА) и наземного лазерного сканирования (LiDAR) стало технологическим прорывом второй половины десятилетия, позволив создавать высокоточные ЦМР и ЦМП, автоматически детектировать деревья и вычислять таксационные показатели (высоту, диаметр, запас) с беспрецедентной точностью. Оснащение лесозаготовительной техники (харвестеры, форвардеры) и лесовозов датчиками GPS/ГЛОНАСС и телематическими системами (John Deere TimberMatic, Komatsu Forest, Ponsse) превратило их в источники IoT-данных, интегрируемых с ГИС для контроля маршрутов, объемов выработки, расхода топлива и предотвращения хищений. Ужесточение экологического законодательства и требований сертификации (FSC, PEFC) сделало ГИС с ее возможностями анализа одновременных снимков и детектирования изменений ключевым инструментом для контроля законности рубок и выявления нарушений лесного законодательства. Произошел переход от простой визуализации данных к сложному пространственному анализу: моделированию доступности лесосек, оптимизации дорожной сети и маршрутов вывозки, оценке экологического ущерба, прогнозированию рисков (пожары, вредители) на основе комплекса геоданных. К концу периода (2020 г.) наметился

тренд на использование возможностей ГИС в связке с машинным обучением и большими данными для перехода от мониторинга текущего состояния к прогнозированию динамики лесных ресурсов, распространения вредителей и оптимизации долгосрочного планирования лесопользования.

Современный этап (с 2020-х гг.) характеризуется переходом к новой парадигме, определяемой облачными вычислениями, веб-технологиями, искусственным интеллектом (ИИ) и интернетом вещей (IoT). Доминирующей тенденцией стало смещение с настольных приложений на облачные платформы и веб-ГИС (ArcGIS Online, Google Earth Engine, специализированные платформы типа EOSDA Forest Monitoring). Это обеспечило невиданную ранее доступность инструментов, данных и вычислительных мощностей, возможность коллективной работы в режиме реального времени и быстрый доступ к результатам анализа с любого устройства. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) перешли из разряда экспериментальных технологий в стандартный инструмент лесного хозяйства. Оснащенные мультиспектральными, гиперспектральными, тепловизионными камерами и лидарами, БПЛА обеспечивают сверхвысокодетальную съемку для точной таксации, мониторинга санитарного состояния на уровне отдельных деревьев, оперативной оценки последствий пожаров или ветровалов, планирования лесовосстановления. В настоящее время всё более применим термин беспилотные авиационные системы (БАС), определяющие комплексные решение, включая устройство, систему управления и навигации в единый компонент. Настоящий прорыв связан с массовым внедрением технологий больших данных (Big Data) и искусственного интеллекта, особенно машинного обучения (МО). Алгоритмы МО (сверточные нейронные сети, методы классификации и кластеризации) автоматизируют трудоемкие процессы дешифрирования снимков: с высокой точностью выделяют породы деревьев по их спектральным и текстурным признакам, обнаруживают свежие вырубki по изменениям в разновременных снимках, классифицируют степень повреждения лесов пожарами, ветром или насекомыми-вредителями, оценивают таксационные показатели (высоту, запас) по данным лидара и оптической съемки (Рисунок2).

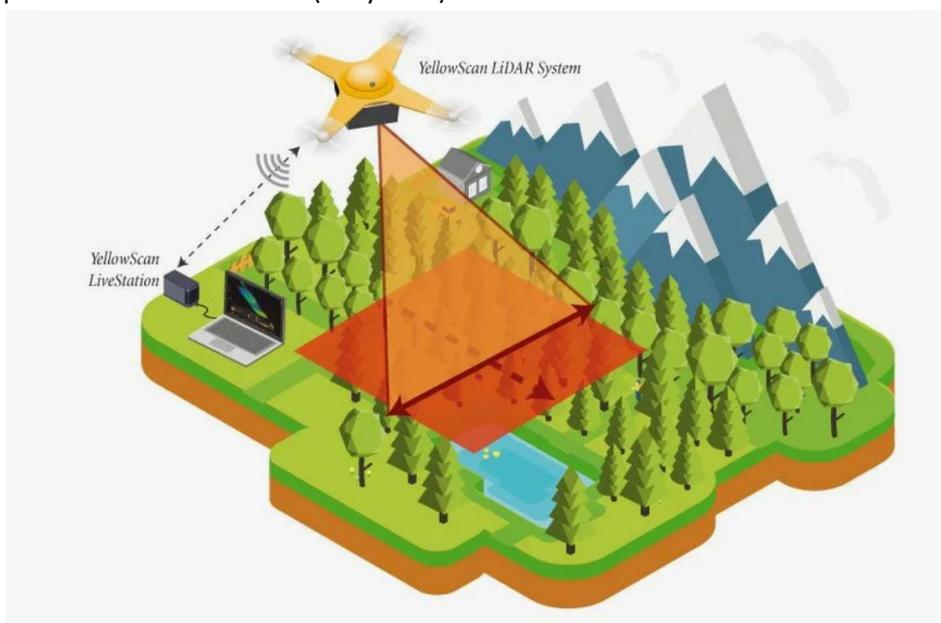


Рисунок 1. Использование лидара в лесопромышленном комплексе

Figure 2. Use lidar in forest industry complex

Активно развивается концепция "Цифровой лес" (Digital Forest), подразумевающая создание комплексных цифровых моделей лесных территорий – динамических "цифровых двойников", интегрирующих данные дистанционного зондирования, ГНСС, наземных IoT-сенсоров (измеряющих влажность почвы, температуру, состояние деревьев), результаты наземной таксации и

лесотаксационные модели. Данные модели позволяют проводить сложные симуляции (прогнозировать рост древостоев, распространение вредителей или пожаров, оценивать углерододепонирующую способность) и оптимизировать управленческие решения. Происходит глубокая интеграция ГИС с корпоративными системами управления ресурсами предприятия (ERP) и Интернетом вещей (IoT) на уровне лесозаготовительных компаний. Одним из примеров использования интеграции является, компания Stora Enso (Финляндия/Швеция) [9]. Это мировой лидер лесопромышленного комплекса активно использует:

- ГИС: Управление лесными ресурсами, планирование рубок, экологический мониторинг.
- ERP (SAP): Управление всей цепочкой создания стоимости.
- IoT (датчики на лесозаготовительной технике (аналогично Segezha), RFID-метки на пачках, сортиментов, датчики на транспорте (лесовозах), сенсоры на производственных линиях).

Данные с ГНСС-датчиков на харвестерах и форвардерах в реальном времени передаются в ГИС для контроля производительности, расхода топлива, соблюдения технологических карт. Системы управления парком техники интегрируются с картографическими сервисами для оптимизации логистики. Формируется единая цифровая экосистема лесного сектора, связывающая государственные органы управления лесами (через государственные лесные реестры и системы типа ЕГАИС), арендаторов лесных участков и конечных потребителей древесины, обеспечивая сквозную прослеживаемость и повышая прозрачность отрасли.

Предпосылки такой эволюции были разнообразны и усиливались с каждым этапом. Ужесточение экологического законодательства на национальном и международном уровне (введение FSC, PEFC сертификации) потребовало строгого документального подтверждения легальности происхождения древесины, сохранения биоразнообразия и высоких природоохранных ценностей лесов – задачи, эффективно решаемые с помощью, ГИС и дистанционного зондирования. Глобальная борьба с незаконными рубками стала мощным стимулом для развития систем мониторинга на основе разновременных спутниковых снимков и алгоритмов автоматического детектирования изменений. Повышение требований к точности учета лесных ресурсов для обеспечения устойчивого управления, составления реалистичных планов лесопользования и выполнения международных обязательств (например, по отчетности в рамках РКИК ООН) потребовало более совершенных методов инвентаризации. Наконец, постоянное давление на снижение затрат в условиях конкурентного рынка заставляло лесозаготовительные компании искать пути оптимизации всех процессов – от планирования лесосек и прокладки дорог до логистики и контроля за техникой – где ГИС-технологии доказали свою высокую экономическую эффективность. Таким образом, развитие ГИС в лесном секторе было не линейным техническим прогрессом, а ответом на конкретные практические потребности отрасли, подкрепленным стремительным развитием смежных технологических областей.

Современные ГИС-платформы и технологии в лесном хозяйстве. Технологический функционал ГИС в лесном секторе представляет собой динамично развивающуюся экосистему, включающую три взаимосвязанных компонента. Программные платформы образуют ее аналитическую целостность: настольные ГИС (ArcGIS Pro, QGIS) обеспечивают базовые функции обработки пространственных данных, тогда как специализированные надстройки ("ЛесГИС", ArcGIS Forestry) адаптируют инструментарий для решения отраслевых задач — от таксации по снимкам до оптимизации лесосечных работ. Облачные сервисы (ArcGIS Online, EOSDA Forest Monitoring), которые революционизируют доступ к вычислительным ресурсам, обеспечивая интеграцию и обработку Big Data в режиме реального времени.

Критическим элементом системы выступают источники пространственных данных. Мультиспектральные снимки Landsat и Sentinel-2 обеспечивают мониторинг динамики лесного

покрова, в то время как радиолокационные данные Sentinel-1 позволяют отслеживать изменения сквозь облачный покров. Воздушное и БПЛА-лидирование генерирует высокоточные 3D-модели древостоев, а ГЛОНАСС/GPS-трекинг фиксирует перемещение техники с погрешностью менее 1 метра. Цифровые модели рельефа (SRTM, ASTER DEM) и актуальные лесоустроительные планшеты завершают создание цифрового каркаса лесной территории.

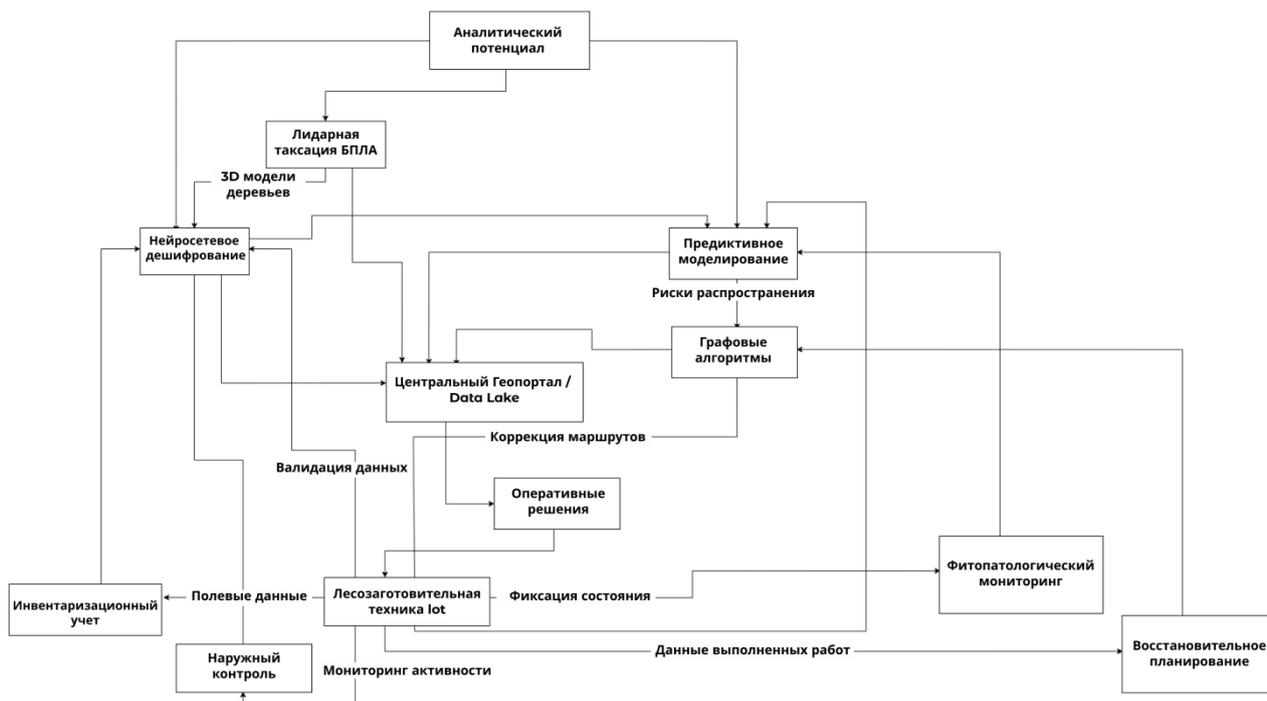


Рисунок 2. Реализация аналитического потенциала ключевых методов

Figure 3. Realizing the analytical potential of key methods

Четыре аналитических метода (нейросетевое дешифрирование, предиктивное моделирование, лидарная таксация, графовые алгоритмы) образуют ядро системы, решающее ключевые задачи лесного хозяйства: инвентаризацию, контроль, фитопатологию и восстановление. Data Lake интегрирует результаты всех методов, обеспечивая единое пространственное хранилище для комплексного анализа и принятия решений. Оперативные решения (например, маршруты вывозки), сформированные на основе анализа в Геопортале, передаются IoT-технике (лесовозам, харвестерам) для исполнения в реальных условиях. Данные с IoT-техники (GPS-треки, объем вывезенной древесины, состояние деревьев) непрерывно поступают обратно в систему, валидируя результаты дистанционного зондирования и калибруя аналитические модели. Замкнутый цикл создает самообучающуюся экосистему: полевые данные улучшают точность аналитики, а уточненные прогнозы и алгоритмы оптимизируют новые операционные действия, формируя "цифровой двойник" лесного хозяйства.

Правовая инфраструктура применения ГИС в РФ прошла три этапа становления. В 2000-х Лесной кодекс (2006) впервые закрепил требования к ГИС-поддержке государственного лесного реестра. К 2010-м сформировалась нормативная база (Приказ Рослесхоза №516) с методиками ДЗЗ-мониторинга. Современный этап (2020-е) характеризуется интеграцией ГИС в ЕГАИС "Лес" с блокчейн-верификацией происхождения древесины. Организационная архитектура включает:

- Федеральный уровень (ФГБУ "Рослесинформ" как оператор ГИС-мониторинга)
- Региональные ДЗЗ Лесничеств с облачными геопорталами
- Корпоративные системы лесопользователей с API-интеграцией в ЕГАИС

- Экономическая эффективность технологий подтверждается снижением издержек:
- На 40-60% сокращаются затраты на таксацию за счет лидарного сканирования
- На 25% уменьшается пробег лесовозов через графовую оптимизацию маршрутов
- На 15% повышается точность расчета запасов при инвентаризации спелых древостоев

Экологические эффекты включают:

- 80% сокращение незаконных рубок в пилотных регионах с дистанционным зондированием - мониторингом;
- 3-кратное ускорение обнаружения очагов короеда;
- Формирование углеродных карт для ESG-отчетности.

Перспективные векторы развития концентрируются в следующих направлениях:

1. Когнитивная аналитика: гибридные ИИ-модели, прогнозирующие динамику фитосанитарного состояния на основе мультисенсорных данных
2. Автономный мониторинг: БПЛА с лазерно-спектрометрическими сенсорами для инспекции труднодоступных территорий
3. Цифровые двойники лесов: динамические FDM-модели, симулирующие рост древостоев в зависимости от сценариев рубок
4. Квантовые ГИС: обработка гиперспектральных данных на квантовых процессорах для идентификации фитопатогенов
5. Децентрализованные реестры: смарт-контракты FSC-сертификации на блокчейне с
Добавь информацию про технологии геоинформационного моделирования.

Заключение. Таким образом, ГИС стали неотъемлемым технологическим ядром современного лесопромышленного комплекса, обеспечивающим переход к точному лесному хозяйству и устойчивому управлению ресурсами. Их применение охватывает весь цикл – от инвентаризации и планирования до контроля и мониторинга последствий

Ключевым драйвером эффективности ГИС является интеграция данных дистанционного зондирования Земли (особенно со спутниковых группировок типа Sentinel и БПЛА), ГНСС-технологий и мощных аналитических возможностей программного обеспечения, включая методы искусственного интеллекта.

Внедрение ГИС приносит комплексный положительный эффект: значительное повышение экономической эффективности лесозаготовок и переработки за счет оптимизации процессов усиление, экологического контроля и борьбы с незаконными рубками, повышение прозрачности и обоснованности управленческих решений в лесном секторе.

Дальнейшее развитие ГИС в ЛПК будет определяться такими тенденциями, как углубление автоматизации с помощью ИИ, массовое использование БПЛА, создание "цифровых двойников" лесных массивов, развитие открытых платформ и интеграция с технологиями блокчейн для обеспечения прослеживаемости древесины.

Соответственно, геоинформационные технологии представляют собой динамично развивающийся и стратегически важный инструмент для модернизации лесопромышленного комплекса, обеспечивающий его конкурентоспособность, экологическую устойчивость и соответствие требованиям цифровой эпохи. Успешная реализация их потенциала требует продолжения работ по совершенствованию нормативной базы, развитию кадрового потенциала и обеспечению доступности современных данных и технологий для всех участников отрасли.

Список использованных источников

1. Иванов А.В., Смирнова О.К. Цифровая трансформация лесного комплекса: роль геоинформатики // Лесной вестник. 2023. № 4. С. 32-41.

2. Петров Д.И. Экономическая эффективность применения ГИС и ДЗЗ в лесозаготовительном производстве // Экономика природопользования. 2022. № 1. С. 15-26.
3. Козлова Е.С. Эволюция дистанционных методов в лесном хозяйстве: от аэрофотосъемки к искусственному интеллекту // Исследование Земли из космоса. 2024. № 2. С. 48-59.
4. Сидоров П.М. Исторический анализ внедрения информационных технологий в лесоустройство России // Лесохозяйственная информация. 2021. № 3. С. 22-31.
5. Николаева Т.А., Воронцов А.П. Большие данные и искусственный интеллект в мониторинге лесов: современное состояние и перспективы // Информационные технологии. 2023. № 7. С. 76-85.
6. Федоров В. Г. Применение данных дистанционного зондирования Земли для выявления незаконных рубок леса // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2022. № 5. С. 63-72.
7. Белова Л.Н. Правовые аспекты использования геоинформационных систем в государственном управлении лесами // Экологическое право. 2023. № 1. С. 41-47.
8. <https://www.iufro.org/publications/proceedings/proceedings-meetings-2011/>
9. <https://www.storaenso.com/en/about-us/our-company/digitalization>

Reference

1. Ivanov A.V., Smirnova O.K. Digital transformation of the forest complex: the role of geoinformatics // Lesnoy Vestnik. 2023. No. 4. P. 32-41.
2. Petrov D.I. Economic efficiency of using GIS and remote sensing in logging // Economics of nature management. 2022. No. 1. P. 15-26.
3. Kozlova E.S. Evolution of remote sensing methods in forestry: from aerial photography to artificial intelligence // Earth exploration from space. 2024. No. 2. P. 48-59.
4. Sidorov P.M. Historical analysis of the introduction of information technologies in forest management in Russia // Forestry information. 2021. No. 3. P. 22-31.
5. Nikolaeva T.A., Vorontsov A.P. Big data and artificial intelligence in forest monitoring: current state and prospects // Information technologies. 2023. No. 7. P. 76-85.
6. Fedorov V.G. Application of Earth remote sensing data to identify illegal logging // Bulletin of the Moscow State Forest University - Forest Bulletin. 2022. No. 5. P. 63-72.
7. Belova L.N. Legal aspects of the use of geographic information systems in public forest management // Environmental law. 2023. No. 1. P. 41-47.
8. <https://www.iufro.org/publications/proceedings/proceedings-meetings-2011/>
9. <https://www.storaenso.com/en/about-us/our-company/digitalization>

REVIEW OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES IN THE FOREST INDUSTRY: CURRENT CAPABILITIES AND PROSPECTS

Valeev Vsevolod Olegovich

First-year postgraduate student

Department of Information Systems and Technologies,

Saint Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov, Saint Petersburg

Email: vsevolod.valeev@gmail.com

© Валеев В. О. 2025

УДК 528.92

Гоманов Д. Е., Иванов В. Г., Кузин П.И.

**МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕСНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ БАС****Гоманов Денис Евгеньевич¹**

кандидат технических наук,
председатель научно-технического комитета Топографической службы Вооруженных сил Российской Федерации

Иванов Василий Геннадьевич²

доктор технических наук, доцент,
председатель Военно-научного комитета Главного управления связи Вооруженных сил Российской Федерации

Кузин Павел Игоревич³

кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных систем и технологий,
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
E-mail: kuzik78@mail.ru

Аннотация. В настоящее время основным способом выявления изменений по фотограмметрическим изображениям по-прежнему остается прямой визуальный анализ разновременных снимков, реализуемый оператором-дешифровщиком наземного комплекса обработки видовой информации, что, в целом, снижает оперативность подготовки цифровых карт. Применение прогрессивных технологий автоматического выявления изменений позволит обеспечить повышение оперативности подготовки цифровых карт, в том числе по разнородным данным дистанционного зондирования. Методы, основанные на технологиях искусственного интеллекта, в частности методы глубокого обучения нейронных сетей, показывают значительное превосходство, что обусловлено формированием в процессе обучения сетей наиболее информативных признаков значимых изменений. Предложенная нейронная сеть и алгоритм реверсивной обработки входных изображений обеспечит более низкую вероятность ошибок первого и второго рода, что дает более высокий показатель индекса Жаккара и высокую точность локализации границ.

Ключевые слова: методы выявления изменений, технологии глубокого обучения, точность локализации, повышение оперативности мониторинга, свёрточная нейронная сеть, цифровая карта.

**MONITORING OF CHANGES IN FOREST OBJECTS BASED ON MULTI-TEMPORAL
PHOTOGRAMMETRIC IMAGES UAV**

Annotation. At present, the main way to detect changes in photogrammetric images is still a direct visual analysis of multi-temporal images, implemented by the operator-decipherer of the ground complex of view information processing, which, in general, reduces the efficiency of digital maps preparation. Application of progressive technologies of automatic change detection will make it possible to improve the efficiency of digital maps preparation, including heterogeneous remote sensing data. Methods based on artificial intelligence technologies, in particular methods of deep learning of neural networks, show significant superiority, which is due to the formation of the most informative signs of significant changes in the process of training neural networks. The proposed neural network and algorithm of reversible processing

of input images will provide a lower probability of errors of the first and second kind, which gives a higher index of Jaccard's index and higher accuracy of boundary localisation.

Keywords: change detection methods, deep learning technologies, localisation accuracy, increased monitoring efficiency, convolutional neural network, digital map.

Введение. Расширение числа (беспилотных авиационных систем) БАС с различными характеристиками сенсоров наряду с факторами, определяющими различные условия съемки (состояние атмосферы, условия освещенности, угол съемки, сезон, и т.п.), накладывает определенные ограничения на возможности автоматического выявления изменений. В связи с этим интерес к разработке методов и средств изменений по разновременным фотограмметрическим изображениям (ФКИ) лесных объектов неуклонно растет [1]. В их основе лежит тот факт, что изменения объектов подстилающей поверхности приводят к изменениям спектрального и контекстного портрета участка местности (отражательной способности, локальной текстуры, геометрии, формы и т.п.), отличающегося от изменений, вызванных другими факторами (атмосферные условия, освещение, угол съемки, характеристики датчика, влажность почвы, сезонные явления и т.п.) [2]. Действующие способы и методы выявления изменений можно формально разделить на три группы: пиксельно-ориентированные, объектно-ориентированные и методы глубокого обучения [1, 3] (рисунк 1).

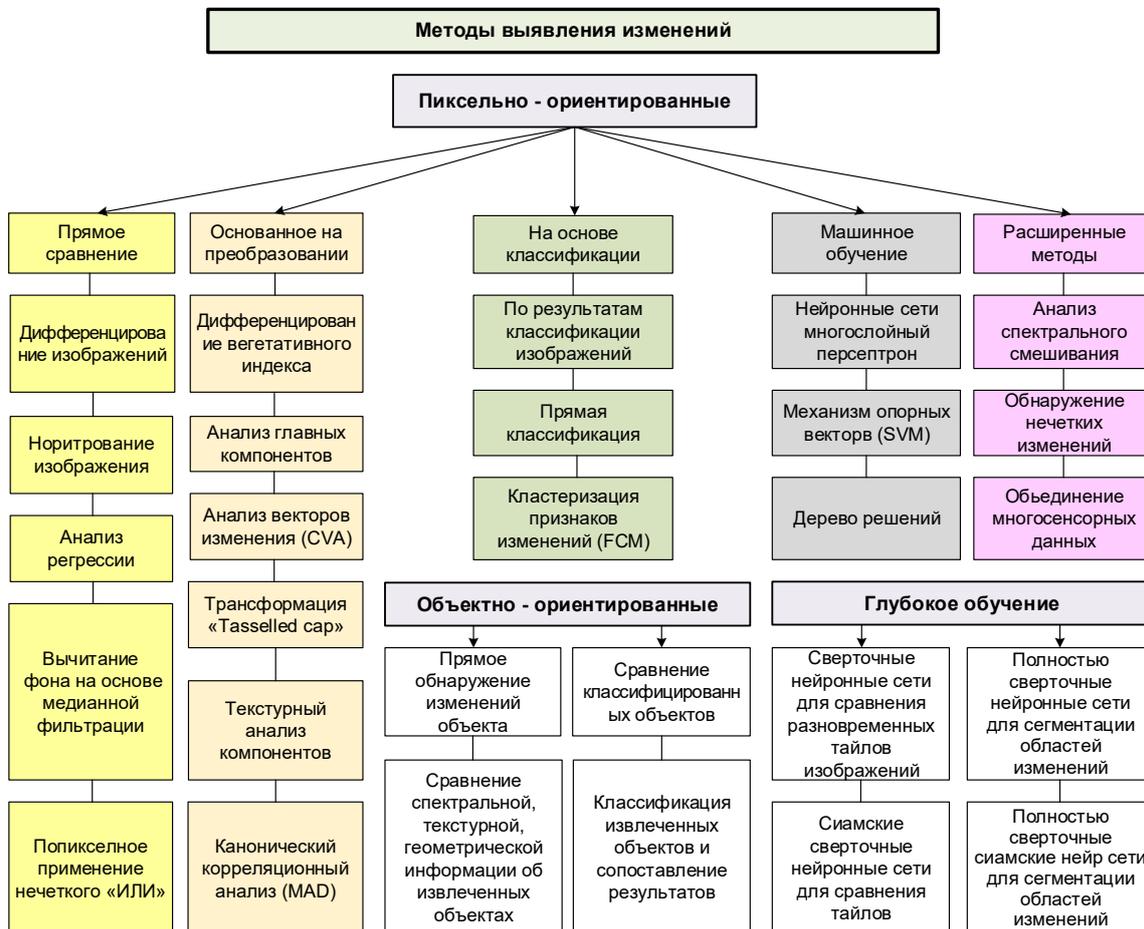


Рисунок 1. Классификация методов выявления изменений

Figure 1. Classification of methods of change detection

Прогрессивной тенденцией в области выявления изменений является разработка интеллектуальных систем, способных функционировать в условиях существенного различия во входных данных на различных этапах анализа изображений (выделение признаков, выбор пороговых значений, классификация и т. п.). К методам, на которых базируются такие системы, относят: вычисления с помощью эволюционных алгоритмов (генетических алгоритмов), нечеткие системы

(включая нечеткую логику), машинное обучение, глубокое обучение, вероятностное вычисление. Так, наиболее современные и эффективные методы выявления изменений основаны на технологии глубокого обучения [4]. За короткое время технологии глубокого обучения привели к значительным достижениям в различных областях. Сверточные нейронные сети (Convolutional neural network, CNN) [5] обеспечили большой прогресс при решении различных задач. Их используют для извлечения информации из про-пространственного контекста, они эффективны в области обработки изображений, видео- и радиосигналов, а также распознавания речи.

Задача. Проведенный сравнительный анализ методов выявления изменений на основе глубокого обучения показывает их значительное преимущество в части точности локализации областей изменений и более низких ошибок первого и второго рода. Анализ показал, что среди современных нейросетевых подходов к выявлению изменений можно выделить два направления: мультимасштабные свёрточные нейронные сети с синтезом разновременных изображений; сямские мультимасштабные полностью свёрточные сети.

Экспериментальный анализ работы свёрточных нейронных сетей с синтезом разновременных каналов показал, что результат выявления изменений, зачастую, зависит от последовательности изображений во входных каналах нейросети, то есть, для одной и той же пары разновременных ФКИ вероятность выявления изменений, связанных с одним и тем же объектом, может зависеть от очерёдности изображений. Таким образом, для повышения достоверности выявления изменений целесообразно обеспечить учет данного фактора (последовательность изображений во входных каналах нейросети).

Решение. С учетом изложенного формулируем математическую постановку задачи выявления изменений. Для матриц разновременных изображений \mathbf{I}_{t_1} и \mathbf{I}_{t_2} необходимо сформировать бинарную матрицу \mathbf{M} , элементы которой определяют наличие изменений в соответствующих областях разновременных изображений:

$$\forall (\mathbf{I}_{t_1}(i, j), \mathbf{I}_{t_2}(i, j)) \rightarrow \begin{cases} \mathbf{M}(i, j) = 1 - \text{есть изменения} \\ \mathbf{M}(i, j) = 0 - \text{иначе} \end{cases}, \quad (1)$$

где $\mathbf{I}_{t_1}(i, j), \mathbf{I}_{t_2}(i, j) \in N$, $N = \{0, 1 \dots 255\}$ - для изображений с градациями яркости 8 бит на пиксель и $N = \{0, 1 \dots 65536\}$ для 16-битных изображений, $i = 1 \dots N$, $j = 1 \dots M$, N, M - размеры изображений в пикселях по осям X, Y соответственно.

Для представления результата выявления изменений в соответствии с этим выражением необходимо выполнить яркостное и геометрическое совмещение:

$$\{\mathbf{I}'_{t_1}(i, j), \mathbf{I}'_{t_2}(i, j)\} = \Omega_{ЯК} \left(\Omega_{ГК} \left(\mathbf{I}_{t_1}(i, j), \mathbf{I}_{t_2}(i, j) \right) \right), \quad (2)$$

где $\Omega_{ГК}$ и $\Omega_{ЯК}$ - алгоритмы геометрической и яркостной коррекции снимков, соответственно.

Алгоритм $\Omega_{ЯК}$ включает следующие шаги:

1. Расчет средних значений яркости μ для каждого изображения:

$$\mu_{I_{t_1}} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \mathbf{I}'_{t_1}(i, j),$$

$$\mu_{I_{t_2}} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \mathbf{I}'_{t_2}(i, j),$$

где n – число анализируемых изображений, m – количество учитываемых факторов.

2. Вычисление среднего квадратичного отклонения значений яркости δ для каждого изображения:

$$\delta_{I_{t_1}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot m} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (\mathbf{I}_{t_1}(i, j) - \mu_{I_{t_1}})^2},$$

$$\delta_{I_{t_2}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot m} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (\mathbf{I}_{t_2}(i, j) - \mu_{I_{t_2}})^2}.$$

3. Яркость коррекция:

$$\begin{cases} \forall \delta_{I_{t_1}} \geq \delta_{I_{t_2}}, \mathbf{I}'_{t_2}(i, j) = \delta_{I_{t_1}} \cdot (\mathbf{I}_{t_2}(i, j) - \mu_{I_{t_2}}) / \delta_{I_{t_2}} + \mu_{I_{t_1}}, \\ \forall \delta_{I_{t_1}} < \delta_{I_{t_2}}, \mathbf{I}'_{t_1}(i, j) = \delta_{I_{t_2}} \cdot (\mathbf{I}_{t_1}(i, j) - \mu_{I_{t_1}}) / \delta_{I_{t_1}} + \mu_{I_{t_2}}. \end{cases}$$

Алгоритм $\Omega_{ГК}$ включает этапы нахождения соответствующих (особых) точек и вычисления параметров функции трансформирования изображений. Данный этап выходит за рамки настоящей статьи.

Для выделения информативных признаков изображений $\mathbf{I}_{t_1}(i, j), \mathbf{I}_{t_2}(i, j)$, отвечающих изменениям матрицы $\mathbf{M}(i, j)$, целесообразно использовать машинное обучение и, в частности, технологию глубокого обучения. В общем виде обработку разновременных изображений функцией нейронной сети можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{M}(i, j) = f_{НС}(\{\mathbf{I}'_{t_1}(i, j), \mathbf{I}'_{t_2}(i, j)\}; \theta), \tag{3}$$

где $f_{НС}(\cdot)$ – функция описывающая модель нейронной сети с обучаемыми параметрами θ (весовые коэффициенты и смещения) и двумя входами для изображений $\mathbf{I}'_{t_1}(i, j), \mathbf{I}'_{t_2}(i, j)$

С учетом рассмотренной выше зависимости результата выявления изменений от фактора очередности каналов, функцию обработки ФКИ (6) можно представить в следующем виде

$$\mathbf{M}_{\max}(i, j) = \max \left[\begin{matrix} f_{НС}(\{\mathbf{I}'_{t_1}(i, j), \mathbf{I}'_{t_2}(i, j)\}; \theta) \\ f_{НС}(\{\mathbf{I}'_{t_2}(i, j), \mathbf{I}'_{t_1}(i, j)\}; \theta) \end{matrix} \right], \tag{4}$$

где результирующая матрица изменений $\mathbf{M}_{\max}(i, j)$ формируется на основе выбора максимальных значений выхода нейронной сети при реверсивном изменении каналов входа.

Обобщенная схема обработки изображений таким подходом представлена на рисунке 2.

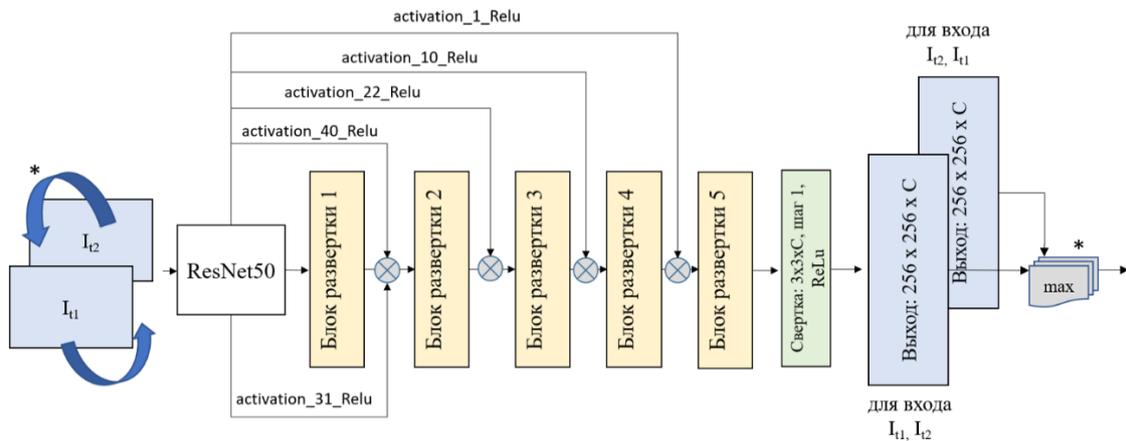


Рисунок 2. Схема реверсивной обработки выходных каналов

Figure 2. Scheme of reverse processing of output channels

В качестве модели нейронной сети $f_{НС}(\cdot)$ для мониторинга изменений разработана полностью сверточная нейронная сеть ResNet 50-CDB (Change detection building, CDB (обнаружение изменений зданий)). Обучение нейронной сети ResNet обычно начинается с предобученных весов, например, на

датасете ImageNet. Это позволяет модели быстрее адаптироваться к новым данным, так как она уже знает базовые признаки изображений, инициализация весов играет ключевую роль. Правильная инициализация помогает избежать проблем с исчезающими градиентами. Особенностью нейронной сети ResNet-50-CDB является использование в качестве кодера признаков предобученной на сегментации зданий нейронной сети ResNet-50. Входными данными являются разновременные изображения (тайлы) объединенные в стек изображения $\mathbf{I}_{comp} = \mathbf{I}'_{i_1}(i, j) \cup \mathbf{I}'_{i_2}(i, j)$.

В качестве метода обучения (оптимизации) сети ResNet-50-CDB наиболее целесообразно использовать метод Adma [6], так как он обеспечивает высокую скорость сходимости алгоритма обучения. Начальная скорость обучения 0,001 с коэффициентом понижения 0,98 каждую эпоху. Обучение нейронных сетей проводилось на общедоступных наборах данных [7]. Наборы включают ФКИ разрешением 0,5 – 1 м с масками изменений антропогенных объектов зданий (строений) расположенных на лесных территориях.

Для расширения обучающего набора данных применялся следующий разработанный подход формирования обучающего пакета данных:

1. Из исходного набора обучающих тайлов разновременных изображений размером 512x512x2 случайным образом вырезались фрагменты 256x256x2xВ, где В это количество обучающих примеров в мини-пакете (рисунок 3).

2. Для каждого обучающего мини-пакета выполнялось:

- масштабирование изображений с коэффициентом 0,85-1,15 и билинейной интерполяцией;
- случайный поворот 0 – 360 градусов;
- случайная перестановка последовательности изображений в каналах;
- случайное изменение яркости (относительно друг друга);
- случайный сдвиг (относительно друг друга).

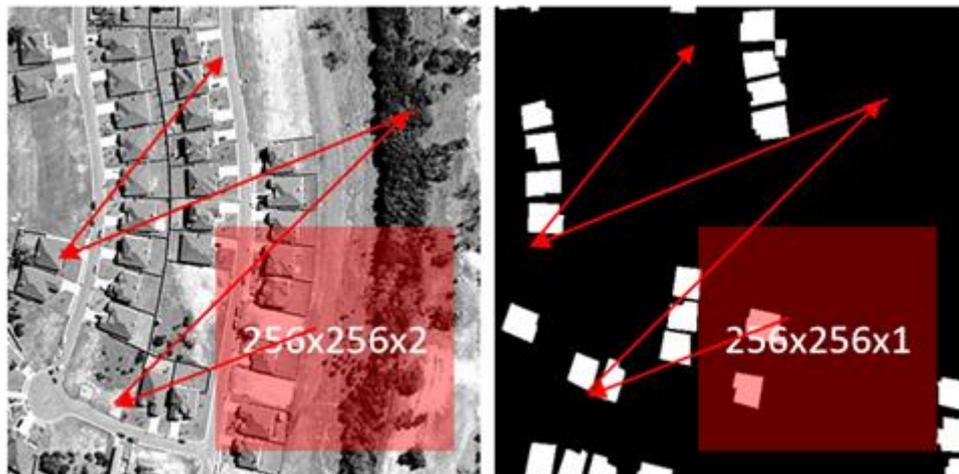


Рисунок 3. Пример случайного вырезания обучающих фрагментов из исходных тайлов разновременных изображений

Figure 3. Example of random cutting of training fragments from the original tiles of multi-temporal images

Результатом выявления изменений, разработанной ResNet-50-CDB представлены на рис. 4.

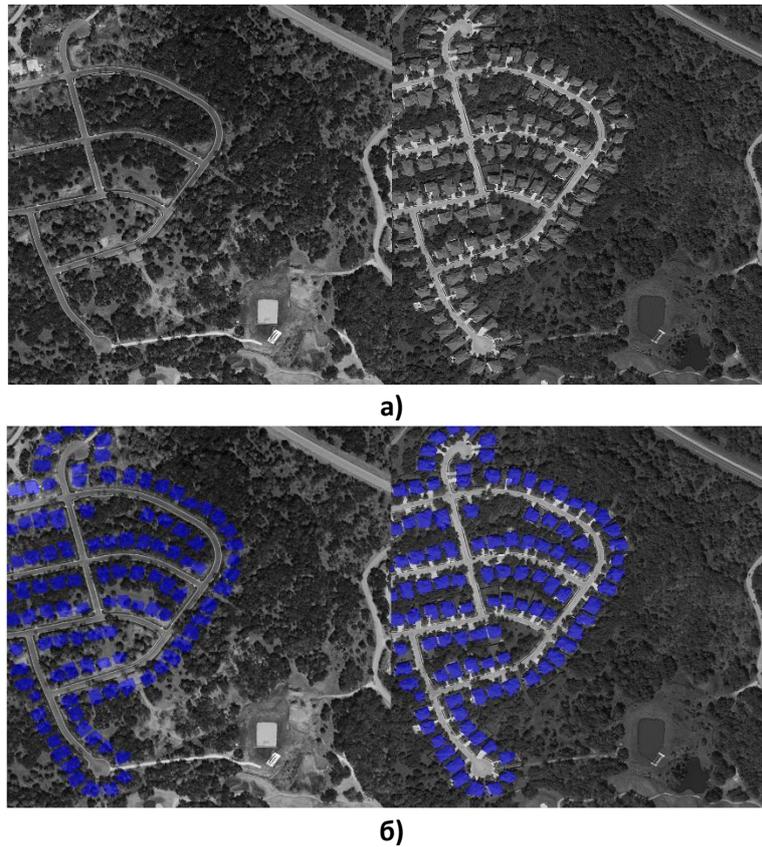


Рисунок 4. Наложение результирующей маски выявленных изменений на разновременные изображения, а) начальное б) конечное

Figure 4. Superimposition of the resulting mask of detected changes on multi-temporal images, a) initial b) final images

Сравнительные результаты оценки показателей точности выявления изменений на местности для разработанной нейронной сети ResNet-50-CDB и сиамской нейронной сети SFCNN-U-Net на базе U-net архитектуры приведены в таблице 1. Оценка показателей точности проводилась на тестовых снимках и открытых ресурсах, представленных вместе с обучающими наборами данных.

Таблица 1. Оценка показателей точности выявления изменений

Table 1. Evaluation of accuracy indicators for change detection

Модель нейронной сети	Содержание тестового набора	Средняя точность обнаружения изменений	Индекс Жаккара	Точность локализации границ
FCNN-ResNet-50-CDB	Только изменения зданий	0,95	0,80	0,86
SFCNN-U-Net	Только изменения зданий	0,98	0,73	0,81

Из анализа представленной таблицы следует, что разработанная нейронная сеть ResNet-50-CDB и алгоритм реверсивной обработки входных изображений обеспечивают более низкую вероятность ошибок первого и второго рода, о чем свидетельствует более высокий показатель индекса Жаккара, а также более высокая точность локализации границ.

Заключение. Мониторинг изменений лесных объектов по разновременным фотограмметрическим изображениям БЛА с применением глубокого обучения нейронных сетей указывает на то, что различные характеристики сенсоров наряду с факторами, определяющими условия съемки (состояние атмосферы, освещение, угол съемки, сезонность, и т.п.), существенно ограничивают возможности автоматического выявления изменений пиксельно-ориентированными методами и осложняют применение объектно-ориентированных подходов.

Методы, базируемые на технологиях искусственного интеллекта, в частности глубокого обучения нейронных сетей, показывают значительную «устойчивость» к указанным выше факторам, что обусловлено формированием в процессе обучения нейронных сетей наиболее информативных признаков фактических (значимых) изменений. Предложенная модель нейронной сети ResNet-50-CDB, обеспечивает выявление изменений лесных объектов и гарантирует более низкую вероятность ошибок и высокую точность локализации границ изменений при мониторинге.

Список использованных источников

1. Иванов В. Г., Гоманов Д. Е., Гришин П. С., Чеглов А. В., Кузин П. И. Анализ изменений местности по разновременным изображениям с применением глубокого обучения нейронных сетей. Телекоммуникации. 2025. № 5. С. 22-30.
2. Бухарин А.В., Кузин П.И., Челахов М.Д. Методика распознавания элементов системы электросвязи. Телекоммуникации. 2022. № 10. С. 35-39.
3. Lipatnikov V., Belov A., Kuzin P., Rabin A. Determination of linear spectral frequencies. В сборнике: AIP Conference Proceedings. Melville, New York, United States of America, 2021. С. 30046.
4. Иванов В.Г., Челахов Д.М., Andrade Inaculo V. Общие предложения по составу персонального АРМ должностного лица органа военного управления. Известия Высшей военной школы Генерального штаба Вооруженных сил Республики Ангола. 2025. № 1. С. 21-24
5. Карапузов А.Н., Мякотин А.В., Кузин П.И. Поддержка защищенности в автоматизированных системах управления повседневной деятельности. Известия Высшей военной школы Генерального штаба Вооруженных сил Республики Ангола. 2025. № 1. С. 25-27.
6. Иванов В. Г., Челахов Д.М., Кузин П.И., Manuel André C. Единое информационное пространство как техническая основа системы управления подразделениями. Известия Высшей военной школы Генерального штаба Вооруженных сил Республики Ангола. 2025. № 1. С. 43-47.
7. Кузин П.И., Челахов Д.М., Chinguinheca T., Voano C. Ключевые принципы по разработке геоинформационного портала военного предназначения. Известия Высшей военной школы Генерального штаба Вооруженных сил Республики Ангола. 2025. № 1. С. 28-33.

Reference

1. Ivanov V. G., Gomanov D. E., Grishin P. S., Cheglov A. I., Kuzin P. I. Analysis of terrain changes based on simultaneous images using deep learning neural networks. V. V., Kuzin P. I. Analysis of terrain changes from multi-temporal images using deep learning neural networks. Telecommunications. 2025. № 5. С. 22-30.
2. Bukharin A.V., Kuzin P.I., Chelakhov M.D. Methodology of recognition of elements of the telecommunication system. Telecommunications. 2022. № 10. С. 35-39.
3. Lipatnikov V., Belov A., Kuzin P., Rabin A. Determination of linear spectral frequencies. In the collection: AIP Conference Proceedings. Melville, New York, United States of America, 2021. С. 30046.
4. Ivanov V.G., Chelakhov D.M., Andrade Inaculo V. General proposals on the composition of the personal ARM of an official of the military administration. News of the Higher Military School of the General Staff of the Armed Forces of the Republic of Angola. 2025. No. 1. Pp. 21-24
5. Karapuzov A.N., Myakotin A.V., Kuzin P.I. Security support in automated systems for managing daily activities. News of the Higher Military School of the General Staff of the Armed Forces of the Republic of Angola. 2025. No. 1. Pp. 25-27.
6. Ivanov V.G., Chelakhov D.M., Kuzin P.I., Manuel André C. Unified information space as the technical basis for a unit management system. News of the Higher Military School of the General Staff of the Armed Forces of the Republic of Angola. 2025. No. 1. Pp. 43–47.

7. Kuzin P.I., Chelakhov D.M., Chinguinheca T., Boano C. Key principles for the development of a military geoinformation portal. News of the Higher Military School of the General Staff of the Armed Forces of the Republic of Angola. 2025. No. 1. Pp. 28-33.

MONITORING OF CHANGES IN FOREST OBJECTS BASED ON MULTI-TEMPORAL PHOTOGRAMMETRIC IMAGES UAV

Gomanov Denis Evgenyevich¹

Candidate of Technical Sciences,
Chairman of the Scientific and Technical Committee of the Topographic Service of the Topographic Service
of the Armed Forces of the Russian Federation

Ivanov Vasily Gennadievich²

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Chairman of the Military Scientific Committee of the Main Communications Directorate of the Armed
Forces of the Russian Federation

Kuzin Pavel Igorevich³

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies,
Saint-Petersburg State Forest technical University named after S. M. Kirov,
E-mail: kuzik78@mail.ru

© Гоманов Д. Е., Иванов В. Г., Кузин П. И. 2025

РАЗДЕЛ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СТАТИСТИКА

SECTION SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT, INFORMATION PROCESSING AND STATISTICS

УДК 004.9

Челпанов В. С., Витлев К. В.

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ЧАСТЬ 2)

Челпанов Владислав Сергеевич

магистр 2 курса

Институт леса и природопользования

кафедра информационных систем и технологий

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова

Санкт-Петербург

E-mail: vlad899766@gmail.com

Витлев Кирилл Александрович

магистр 2 курса ИЛиП

Институт леса и природопользования

кафедра информационных систем и технологий

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова

Санкт-Петербург

E-mail: mr.vitlev@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается процесс разработки пользовательского интерфейса для интеллектуальной геоинформационной системы. Особое внимание уделено проектированию интерфейса на основе методологии UX, обеспечивающей интуитивность, отзывчивость и адаптивность системы. Описана клиент-серверная архитектура системы с использованием Vue.js и Flask, реализация интерактивной карты и модуля аналитики. Представлены результаты тестирования прототипа, подтверждающие его производительность и функциональность, а также перспективы дальнейшего развития системы.

Ключевые слова: интерактивный пользовательский интерфейс, геоинформационная система, UX-дизайн, UI-дизайн, интеллектуальная система.

DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE USER INTERFACE FOR AN INTELLIGENT GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM: EXPERIENCE AND PROSPECTS (PART 2)

Annotation. This article examines the development of a user interface for an intelligent geographic information system. Particular attention is paid to interface design based on UX methodology, ensuring the system's intuitiveness, responsiveness, and adaptability. The article describes the system's client-server architecture using Vue.js and Flask, as well as the implementation of an interactive map and analytics module. The article presents prototype testing results confirming its performance and functionality, as well as prospects for further development.

Keywords: *Interactive user interface, geographic information system (GIS), UX design, UI design, intelligent system.*

Введение. Современные геоинформационные системы (ГИС) являются мощным инструментом для сбора, анализа и визуализации пространственных данных, находя применение в таких областях, как экология, городское планирование, лесное хозяйство и многих других. Однако их функциональная насыщенность зачастую сопровождается высокой сложностью пользовательского интерфейса, что создает значительный барьер для неподготовленных пользователей. Существующие решения, несмотря на свою мощь, часто характеризуются перегруженными интерфейсами, требующими длительного обучения и снижающими эффективность работы.

В связи с этим актуальной задачей становится проектирование интуитивного, отзывчивого и адаптивного пользовательского интерфейса, который не только предоставляет доступ к сложным данным и аналитическим функциям, но и делает это взаимодействие комфортным и эффективным. Успех такой системы в значительной степени определяется качеством ее пользовательского опыта (UX), который охватывает все аспекты взаимодействия пользователя с продуктом.

Целью данной работы является проектирование и разработка прототипа пользовательского интерфейса для геоинформационной системы, ориентированной на задачи мониторинга и аналитики, с акцентом на интуитивность, производительность и визуальную ясность. В основе проектирования лежит методология UX, а для реализации применяются современные веб-технологии, включая фреймворк Vue.js на клиентской стороне и микрофреймворк Flask на серверной.

В статье рассматриваются ключевые принципы проектирования интерфейса, такие как интуитивность использования, отзывчивость и адаптируемость под различные устройства. Также описывается клиент-серверная архитектура системы с использованием REST API для эффективного обмена данными, особенности реализации интерактивной карты и модуля аналитики. Приводятся результаты тестирования работоспособности прототипа, подтверждающие его соответствие поставленным функциональным требованиям и высокую производительность при работе с большими объемами геоданных.

Проектирование интерфейса. Проектирование пользовательского интерфейса (UI) для геоинформационной системы (ГИС) является сложной и многоступенчатой задачей, требующей учета множества факторов. Проектирование интерфейса проводилось по методологии UX. UX — это методология проектирования комфортного и эффективного взаимодействия с приложением. Важнейшим аспектом удобной работы пользователя с ГИС является интуитивность интерфейса. UI должен не только визуализировать данные, но и обеспечивать плавное и быстрое взаимодействие с ними.

Принципы UX/UI-дизайна. При проектировании пользовательского интерфейса основное внимание уделялось следующим аспектам: интуитивность использования, отзывчивость и производительность, адаптируемость и масштабируемость.

Интуитивность использования определяет, насколько легко пользователи могут ориентироваться в интерфейсе системы без необходимости чтения документации. Элементы интерфейса должны быть легко узнаваемы и понятны пользователям. Например, кнопки, отвечающие за масштабирование карты или смену слоев, были оформлены таким образом, чтобы их можно было легко отличить друг от друга и без труда найти на панели инструментов. Избыток элементов перегружает интерфейс и затрудняет взаимодействие с ним, упрощенный дизайн делает его более интуитивным и упрощает работу пользователя.

Отзывчивость и производительность определяют скорость и эффективность взаимодействия пользователя с системой. Интерфейс, работающий плавно и без задержек, улучшает общее восприятие системы и делает работу с программой более комфортной и продуктивной. Длительный

отклик заставляет пользователя сомневаться в работоспособности всей ГИС, поэтому хорошая оптимизация важна для эффективной системы.

Адаптивность и масштабируемость определяет работу на различных устройствах. Одна из перспектив развития — это адаптивность системы под различные устройства. Приложение будет одинаково эффективно работать как на настольных компьютерах, так и на мобильных устройствах. Для этого планируется реализация адаптивной верстки, позволяющая динамически изменять размер и расположение элементов интерфейса в зависимости от экрана устройства пользователя. Так же в системе требуется ночной и дневной режим работы интерфейса, что упрощает работу пользователя в разных условиях освещения. Ночной режим использует более темные цвета для фона и контрастные для текста, обеспечивая комфортную работу в условиях низкой освещенности.

Архитектура системы и взаимодействие клиент-сервер. Разработанная система имеет клиент-серверную архитектуру, где вся обработка данных происходит на сервере, а пользовательский интерфейс отвечает за их отображение и взаимодействие (рис. 1). Клиент посылает запрос на сервер, серверная часть принимает запрос выполняет обработку данных, после обработанные данные отправляет клиенту, база данных отвечает за хранение и управление информацией. Эта архитектура позволяет оптимизировать нагрузку на пользовательское устройство и снижает требования к его производительности.

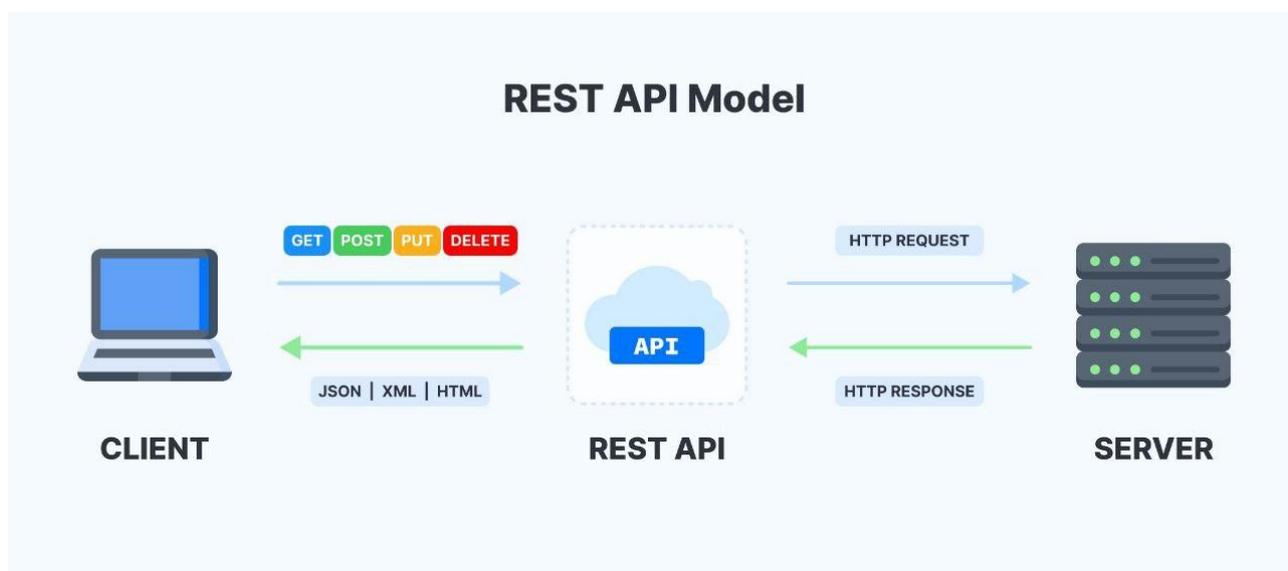


Рисунок 1- Клиент-серверная архитектура

Figure 1- Client-server architecture

Клиентская часть системы построена с использованием фреймворка Vue.js, что позволило реализовать динамические и отзывчивые компоненты интерфейса, такие как интерактивные карты и панели управления данными. Серверная часть разработана на Flask, легковесном серверном фреймворке, который поддерживает быстрый обмен данными между клиентом и сервером.

Коммуникация между клиентом и сервером реализована с помощью REST API, что упрощает обмен данными и делает систему легко масштабируемой. API позволяет передавать пространственные данные, такие как координаты деревьев, и обновлять их состояние в реальном времени. Кроме того, использование REST API открывает возможности для интеграции системы с внешними сервисами и базами данных.

Особенности реализации карт и аналитики. Важнейшим компонентом ГИС является возможность визуализации данных на карте. Реализованный прототип поддерживает интерактивную карту (рис. 2), с объектами, такие как деревья, отображаются с помощью меток(масок), цвет которых

указывает на их состояние (деловые, полуделовые и дровяные деревья). Это помогает пользователю быстро ориентироваться в данных и принимать решения на основе визуализированной информации.

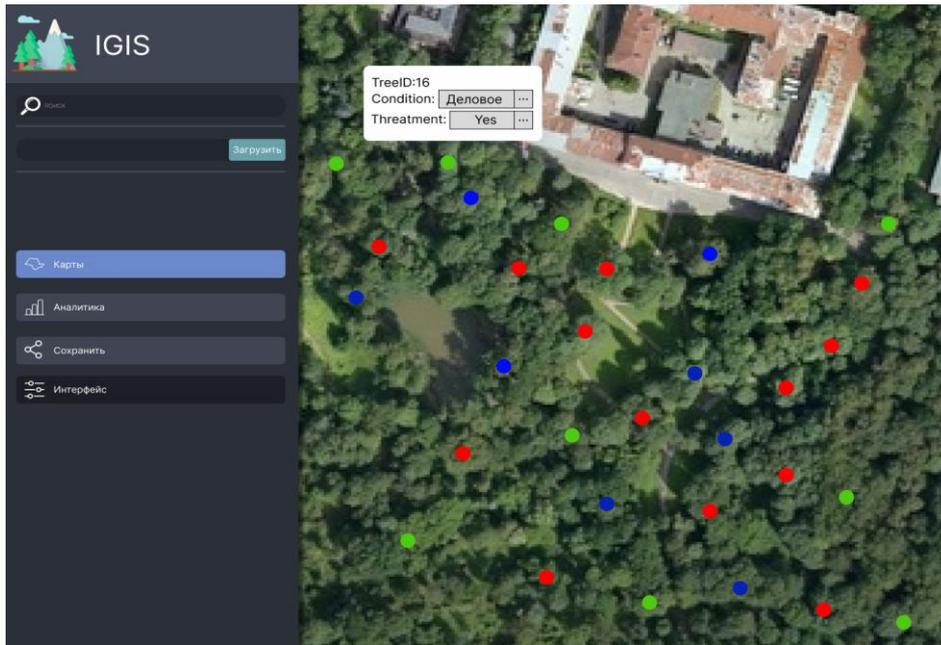


Рисунок 2- Интерфейс программы

Figure 2- Program interface

Кроме того, система включает вкладку аналитики (рис.3), где представлены данные о восстановлении лесов. Данные отображаются в виде графиков, построенных на основе пространственных данных (лесовосстановление, лесоразведение, природное возобновление). Эти графики позволяют анализировать динамику лесовосстановительных работ за определенные периоды времени, что важно для мониторинга экологической ситуации и эффективности мероприятий. Немаловажным этапом на пути к реализации интерфейса ГИС является использование интерактивного, понятного и логически структурированного интерфейса с определённым функционалом[10].

Функционал интерактивных интерфейсов в геоинформационных системах имеет большой потенциал для практического развития и различных способов взаимодействия с конечным пользователем. Одним из вариантов адаптации интерфейсов возможен принцип использования UX и UI дизайна при формировании внешнего стиля и каркаса основного функционала. Вторым способом взаимодействия возможно использование VR и AR технологий, где большинство функций будет выполнено в стиле трёхмерных масштабируемых иконографических элементов. Однако, для организации такого способа отображения данных, необходимо и внешнее устройство в виде сенсорной панели или VR шлем, что требует дополнительных затрат на использование и применение данных технологий в сфере геоинформационных технологий.



Рисунок 3- Аналитические данные

Figure 3- Analytical data

Тестирование прототипа. Тестирование прототипа показало высокую производительность системы и соответствие заявленным функциональным требованиям. Тестирование включало проверку работоспособности всех элементов интерфейса, таких как:

- Отображение и редактирование данных на карте.
- Обновление состояния объектов в реальном времени.
- Построение графиков аналитики на основе пространственных данных.

Также проверялась работа системы в условиях разной нагрузки, в том числе при работе с большими объемами геоданных. В ходе тестирования система сработала корректно, ожидаемые результаты и реальные совпали(рис.4-6).

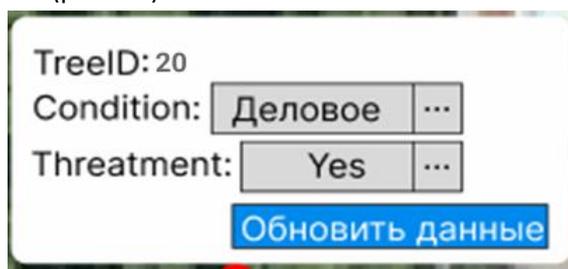


Рисунок 4 - Изменения данных на сервере посредством пользовательского интерфейса

Figure 4 - Changing data on the server via the user interface

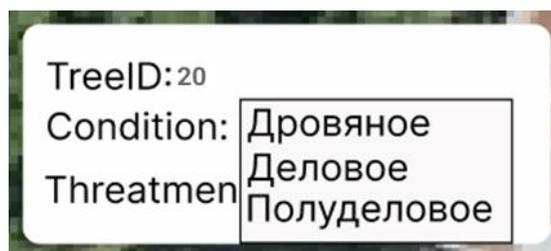


Рисунок 5- Опции для выбора

Figure 5- Options to select

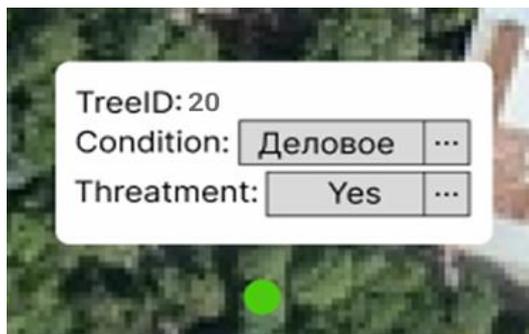


Рисунок 6- Изменения в интерфейсе

Figure 6- Interface changes

При тестировании вкладки аналитики алгоритмы визуализировали данные корректно.

Заключение. Разработка интерактивного пользовательского интерфейса для интеллектуальной геоинформационной системы (ГИС) является важной задачей в современном анализе пространственных данных. Исследование существующих решений, таких как QGIS и ArcGIS, показало, что, несмотря на их функциональность, многие интерфейсы остаются сложными и перегруженными, что затрудняет их использование для неподготовленных пользователей. Это подчеркивает необходимость создания интуитивных и простых интерфейсов, которые позволят максимально эффективно взаимодействовать с системой.

В процессе проектирования интерфейса были учтены ключевые требования: интуитивность, отзывчивость и адаптивная визуализация данных. Использование технологий, таких как Vue.js и Leaflet.js, а также препроцессора SCSS, упростило процесс разработки и обеспечило высокую производительность системы, позволяя с большой скоростью обрабатывать геопространственный данные и визуализировать информацию.

Система, разработанная в рамках данной работы, представляет собой прототип, который имеет потенциал для дальнейшего развития и улучшения. В дальнейшем планируется реализация адаптивной верстки, что позволит пользователям работать с ГИС на различных устройствах. Внедрение поддержки дополнительных форматов данных позволит пользователю работать с более широким набором пространственных данных.

Список использованных источников

1. Сеитов Б.А., Пискорская С.Ю. К вопросу о геопространственной информации// Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. №14. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-geoprostranstvennoy-informatsii> (дата обращения: 20.04.2024)
2. Дорогина, А. С. Front-end разработка / А. С. Дорогина, О. Н. Сафонова, Н. В. Тутова // Телекоммуникации и информационные технологии. – 2015. – Т. 2, № 2. – С. 69-72. – EDN WGBZIR.
3. Джон Дакетт HTML и CSS. Разработка и дизайн веб -сайтов.
4. W3schools html [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://www.w3schools.com/html/>
5. W3schools css [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://www.w3schools.com/css/default.asp>
6. QGIS [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://www.qgis.org/ru/site/about/>
7. ArcGIS [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://resources.arcgis.com/ru/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
8. Google Earth [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://earth.google.com/web/@59.97167589,30.31588281,-8.13547617a,3036.08232038d,89.95656046y,-149.77683228h,89.07541567t,0r/data=OgMKATA>
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665369 Российская Федерация. Интеллектуальная геоинформационная система (IGIS): № 2023664113: заявл. 03.07.2023; опубл. 14.07.2023 / М. Р. Вагизов, К. А. Витлев, В. С. Челпанов; заявитель Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова».

10. Вагизов М. Р. Разработка интерактивных геоинформационных систем: принципы построения и конструирования системы / М. Р. Вагизов // Информационные системы и технологии: теория и практика: Сборник научных трудов научно-технической конференции института леса и природопользования, Санкт-Петербург, 01 февраля 2017 года. Том Выпуск 9. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2017. – С. 21-27. – EDN YRLWBX.

Reference

1. Seitov B.A., Piskorskaya S.Y. On the issue of geospatial information// Actual problems of aviation and cosmonautics. 2018. No. 14. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-geoprostranstvennoy-informatsii> (date of request: 04/20/2024)
2. Dorogina, A. S. Front-end development / A. S. Dorogina, O. N. Safonova, N. V. Tutova // Telecommunications and information technology. – 2015. – Vol. 2, No. 2. – pp. 69-72. – EDN WGBZIR.
3. John Duckett HTML and CSS. Website development and design.
4. W3schools html [Electronic resource]. Access mode - <https://www.w3schools.com/html/>
5. W3schools css [Electronic resource]. Access mode - <https://www.w3schools.com/css/default.asp>
6. QGIS [Electronic resource]. Access mode - <https://www.qgis.org/ru/site/about/>
7. ArcGIS [Electronic resource]. Access mode - <https://resources.arcgis.com/ru/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
8. Google Earth [Electronic resource]. Access mode - <https://earth.google.com/web/@59.97167589,30.31588281,-8.13547617a,3036.08232038d,89.95656046y,-149.77683228h,89.07541567t,0r/data=OgMKATA>
9. Certificate of State registration of a computer program No. 2023665369 Russian Federation. Intellectual Geoinformation System (IGIS): No. 2023664113: application 07/03/2023: published 07/14/2023 / M. R. Vagizov, K. A. Vitlev, V. S. Chelpanov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov".
10. Vagizov M. R. Development of interactive geographic information systems: principles of construction and design of the system / M. R. Vagizov // Information systems and technologies: theory and practice: Collection of scientific papers of the scientific and technical conference of the Institute of Forestry and Nature Management, St. Petersburg, February 1, 2017. Volume Issue 9. - St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov, 2017. - P. 21-27. - EDN YRLWBX.

DEVELOPING AN INTERACTIVE USER INTERFACE FOR AN INTELLIGENT GEOINFORMATION SYSTEM: EXPERIENCE AND PROSPECTS (PART 2)

Chelpanov Vladislav S.,

2st year Master degree at ILiP

Department of Information Systems and Technologies,

St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov

Saint-Petersburg

E-mail: vlad899766@gmail.com

Vitlev Kirill A.,

2st year Master degree at ILiP

Department of Information Systems and Technologies,

St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov

Saint-Petersburg

E-mail: mr.vitlev@mail.ru

©Челпанов В.С., Витлев К. А. 2025

Хабаров С. П.,¹ Вагизов М. Р.^{1,2}

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ HTTP/3 И QUIC С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PYTHON-КЛИЕНТА И WIRESHARK

Хабаров Сергей Петрович¹

Кандидат технических наук, доцент
кафедра информационных систем и технологий,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
Санкт-Петербург
E-mail: serg.habarov@mail.ru

^{1,2}Вагизов Марсель Равильевич

Доктор технических наук, доцент
Заведующий кафедрой Информационных систем и технологий
¹ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
Профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности
² ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург
E-mail: bars-tatarin@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ взаимодействия протоколов HTTP/3 и QUIC с использованием Python-клиента и инструмента Wireshark. Исследование охватывает разработку специализированного клиента на основе библиотеки aioquic, настройку захвата и расшифровки сетевого трафика, а также детальный разбор ключевых этапов взаимодействия, таких как криптографическое рукопожатие, мультиплексирование потоков и обработка данных. Особое внимание уделено практическим аспектам реализации протокола, включая динамическую идентификацию соединений (Connection ID) и преимущества QUIC перед TCP. Результаты работы подтверждают эффективность HTTP/3 и QUIC для современных веб-приложений, демонстрируя их устойчивость к сетевым изменениям и снижение задержек.

Ключевые слова: HTTP/3, QUIC, Python, Wireshark, aioquic, TLS 1.3, мультиплексирование, Connection ID, анализ трафика, сетевые протоколы.

ANALYSIS OF HTTP/3 AND QUIC INTERACTION USING A PYTHON CLIENT AND WIRESHARK

Abstract. This article presents a comprehensive analysis of the interaction between HTTP/3 and QUIC protocols using a Python client and the Wireshark tool. The study covers the development of a specialized client based on the aioquic library, the setup for capturing and decrypting network traffic, and a detailed breakdown of key interaction stages, such as cryptographic handshakes, stream multiplexing, and data processing. Special attention is given to practical aspects of protocol implementation, including dynamic connection identification (Connection ID) and the advantages of QUIC over TCP. The results confirm the efficiency of HTTP/3 and QUIC for modern web applications, demonstrating their resilience to network changes and reduced latency.

Keywords: HTTP/3, QUIC, Python, Wireshark, aioquic, TLS 1.3, multiplexing, Connection ID, traffic analysis, network protocols.

Введение. Современные тенденции развития веб-технологий свидетельствуют о стремительном движении к повышению эффективности передачи данных. Одним из этапов этого процесса стало утверждение в 2022 году протокола HTTP/3 в качестве официального стандарта [1]. Новый протокол представляет собой значительный сдвиг от классической парадигмы TCP/TLS и основывается на транспортном протоколе QUIC [2]. В отличие от классического подхода, QUIC сочетает транспортные и криптографические функции, создавая единое комплексное решение для быстрого и безопасного обмена информацией.

Ключевое отличие HTTP/3 заключается в переходе от TCP к QUIC, который работает поверх UDP. Благодаря этому удастся решить проблему блокировки головной части очереди (Head-of-Line blocking), которая была актуальной в нестабильных сетях. Дополнительно QUIC встраивает TLS 1.3 непосредственно в транспортный уровень [3], что позволяет ускорить установку соединения и начать передачу данных уже при первом обмене пакетами (0-RTT).

Однако технологические преимущества HTTP/3 привели к значительным сложностям в анализе сетевого взаимодействия. Остро встает проблема анализа зашифрованного трафика, так как QUIC совмещает транспортный и криптографический уровни, делая невозможным их независимый разбор, в отличие от привычной схемы TCP + TLS.

В данной работе предпринимается попытка комплексного исследования процесса взаимодействия HTTP/3 клиента с сервером с использованием современных инструментальных средств. В качестве методологической основы предлагается подход, сочетающий разработку специализированного клиента на Python, использование инструмента захвата и анализа трафика (Wireshark) и методику расшифровки QUIC-трафика.

Выбор тестового сервера http3.is обусловлен его эталонной реализацией протокола, что обеспечивает репрезентативность результатов исследования. Полученные данные позволят не только продемонстрировать ключевые особенности работы HTTP/3, но и выявить практические аспекты реализации протокола, которые могут иметь значение для разработчиков сетевых приложений и администраторов веб-инфраструктур.

1. Постановка задачи. Основная цель настоящей работы заключается в разработке комплексного подхода к анализу полного цикла взаимодействия между HTTP/3 клиентом и сервером. Для достижения этой цели предстоит решить три взаимосвязанные задачи. Во-первых, необходимо разработать специализированное клиентское приложение на Python, способное не только устанавливать QUIC-соединение с тестовым сервером http3.is, но и корректно обрабатывать все этапы HTTP/3-коммуникации.

Во-вторых, требуется создать инфраструктуру для захвата и последующей расшифровки сетевого трафика, включая настройку Wireshark для корректной интерпретации QUIC-пакетов и организацию процесса извлечения ключей сессии TLS. В-третьих, предстоит провести детальный анализ захваченного трафика с выделением ключевых этапов взаимодействия - от начального рукопожатия до обработки прикладных HTTP-транзакций.

Особое внимание в исследовании будет уделено верификации соответствия наблюдаемого поведения требованиям RFC 9114 (HTTP/3) и RFC 9000 (QUIC), что позволит не только продемонстрировать работу протокола на практике, но и выявить возможные особенности реализации в конкретных программных решениях. Полученные результаты должны дать целостное представление о процессе установления QUIC-соединения, особенностях мультиплексирования потоков и механизме обработки ошибок на транспортном уровне.

2. Реализация HTTP/3 клиента. Для практической реализации клиентского приложения, взаимодействующего с сервером по протоколу HTTP/3, была выбрана библиотека aioquic, обеспечивающая реализацию протоколов QUIC и HTTP/3 в среде Python [4]. Благодаря своей модульной архитектуре и поддержке асинхронного программирования с использованием asyncio, aioquic предоставляет широкие возможности для разработки и тестирования сетевых приложений, использующих новые стандарты передачи данных в интернете.

С использованием этой библиотеки был разработан HTTP/3 клиент, способный подключаться к общедоступному веб-сайту <https://http3.is/> по протоколу HTTP/3, отправлять ему GET-запросы и получать от него ответы. При его реализации использовались следующие компоненты библиотеки aioquic:

- connect – создаёт асинхронное QUIC-соединение с сервером [5];
- QuicConfiguration – обеспечивает настройку параметров соединения, включая выбор протокола (ALPN), проверку сертификатов и другие параметры;
- H3Connection – реализует работу с HTTP/3-семантикой поверх QUIC;
- HeadersReceived, DataReceived – классы событий, предназначенные для обработки заголовков и тела ответа от сервера.

Представленный на рис. 1 код демонстрирует практическую реализацию HTTP/3 клиента средствами библиотеки aioquic. Он последовательно описывает все аспекты установления асинхронного соединения, формирования HTTP-запросов и обработки входящих данных от сервера, обеспечивая полную картину функциональности клиента.

```

client-1.py
1 import asyncio
2 from aioquic.asyncio import connect
3 from aioquic.quic.configuration import QuicConfiguration
4 from aioquic.h3.connection import H3Connection
5 from aioquic.h3.events import HeadersReceived, DataReceived
6
7 async def http3_get():
8     cfg = QuicConfiguration(is_client=True, alpn_protocols=["h3"])
9     cfg.verify_mode = False # Отключаем проверку сертификатов для теста
10    async with connect("http3.is", 443, configuration=cfg) as client:
11        h3 = H3Connection(client, quic)
12        stream_id = client.quic.get_next_available_stream_id()
13        # Отправляем HTTP/3-запрос
14        headers = [{"method": "GET"}, {"scheme": "https"},
15                  {"authority": "http3.is"}, {"path": "/"}]
16        h3.send_headers(stream_id, headers, end_stream=True)
17        client.transmit()
18        # Получаем ответ
19        site_body = b""
20        done = asyncio.Event()
21        def handle_event(event):
22            nonlocal site_body
23            for h3_event in h3.handle_event(event):
24                if isinstance(h3_event, HeadersReceived):
25                    print("--> Заголовки:\n", dict(h3_event.headers))
26                elif isinstance(h3_event, DataReceived):
27                    site_body += h3_event.data
28                if h3_event.stream_ended:
29                    done.set()
30            # Сохраняем обработчик событий
31            orig_handler = client.quic_event_received
32            def wrapped_handler(event):
33                orig_handler(event): handle_event(event)
34            client.quic_event_received = wrapped_handler
35        try:
36            await asyncio.wait_for(done.wait(), timeout=10)
37            return site_body.decode("utf-8", errors="ignore")
38        except asyncio.TimeoutError:
39            return "Превышено время ожидания ответа"
40    async def main():
41        print(f"--> Подключение к 'http3.is' по HTTP/3...")
42        result = await http3_get()
43        print(f"--> Ответ сервера:")
44        print(result[:1000]) # Выводим первые 1000 символов
45    asyncio.run(main())
46
  
```

Рисунок 1. Программный код HTTP/3 клиента на базе библиотеки aioquic.

Figure 1. HTTP/3 client program code based on the aioquic library.

В коде программы определены две функции: `http3_get()` и `main()`. Каждая из них выполняет строго отведённую ей роль, гарантирующую корректную организацию взаимодействия с сервером по протоколу HTTP/3.

Функция `http3_get()` обеспечивает все этапы сетевого взаимодействия, начиная с установки асинхронного соединения с сервером и заканчивая обработкой полученных данных. Ключевые этапы её работы включают:

- *Настройка конфигурации и подключение.* На этом этапе создается экземпляр класса `QuicConfiguration` с необходимыми параметрами (выбор режима клиента, поддержка протокола HTTP/3, отключение проверки сертификатов для тестовых целей), а также устанавливается асинхронное соединение с сервером с использованием функции `connect()`;
- *Передача HTTP-запроса.* Выполняется генерация набора обязательных HTTP-заголовков (`:method`, `:scheme`, `:authority`, `:path`) и их отправка через экземпляр класса `H3Connection`. Запрос серверу передается немедленно с помощью метода `client.transmit()`.
- *Обработка ответа сервера.* Сервер возвращает ответ, состоящий из заголовков и тела документа. Эти данные поступают через обработчики событий `HeadersReceived` и

DataReceived, которые собирают ответ в виде байтов, а затем преобразуют его в строку (site_body).

- *Завершение и возврат результата.* Как только поток данных прекращён, основной обработчик событий сигнализирует завершение, и результат возвращается вызвавшей стороне.

Вторая функция, main(), выполняет управляющую роль, контролируя общий процесс выполнения программы. Осуществляет инициацию асинхронного сеанса через вызов функции http3_get() и управление выводом промежуточных сообщений и конечного результата.

Такая организация кода оптимизирует процессы коммуникации с сервером по протоколу HTTP/3, позволяя снизить нагрузку на систему и ускорить обмен данными. Деление ответственности между отдельными функциями повышает удобочитаемость и улучшает масштабируемость решения.

3. Тестирование работы HTTP/3 клиента. Основной целью тестирования является подтверждение возможности разработанного HTTP/3-клиента отправлять запросы и получать корректные ответы от удаленного сервера. Для этого важно проверить правильность формирования и обработки заголовков, а также проанализировать содержимое возвращаемой страницы.

При запуске программы на выполнение создается конфигурация клиента, включающая обязательные настройки, и устанавливается соединение с сервером http3.is по порту 443:

```
cfg = QuicConfiguration(is_client=True, alpn_protocols=["h3"])
async with connect("http3.is", 443, configuration=cfg) as client:
```

После чего создается объект типа H3Connection, который формирует и отправляет HTTP-заголовки:

```
headers = [ (b":method", b"GET"), (b":scheme", b"https"),
            (b":authority", b"http3.is"), (b":path", b"/"), ]
```

Эти заголовки указывают метод запроса (GET), схему (https), авторитарный домен (http3.is) и путь (/). Они необходимы для правильной идентификации запроса сервером. Когда от сервера приходят данные, они собираются и декодируются в строку вида:

```
site_body += h3_event.data
```

Важно отметить, что тело ответа возвращается частями, каждая из которых добавляется к общей переменной site_body. В результате программа выводит заголовки и первую тысячу символов полученной HTML страницы (рис. 2).

```
Console
--> Подключение к 'http3.is' по HTTP/3...
--> Заголовки
: {b':status': b'200', b'content-length': b'643', b'server': b'Varnish', b'retry-after': b'0', b'content-type': b'text/html', b'alt-svc': b'h3=":443"}
--> Ответ сервера:
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
<link href="/css/checker.css" rel="stylesheet" type="text/css">
<title>HTTP/3!</title>
</head>
<body>
<div class="parent-wrapper">
<div class="body-wrapper">
<video playsinline autoplay muted loop width="500" height="500"><source src="/robot_http3_success_V3.mp4" type="video/mp4">
Your browser does not support the video tag, but it does support HTTP/3!
</video>
<div class="fastly-logo"></div>
</div>
</div>
</body>
</html>
```

Рисунок 2. Результат взаимодействия HTTP/3-клиента с сервером http3.is.

Figure 2. Result of interaction between HTTP/3 client and http3.is server.

После успешного подключения и обработки запроса, сервер возвращает набор заголовков, которые помогают определить статус соединения и особенности взаимодействия. Ключевое значение

имеет заголовок `alt-svc`, поскольку именно он сигнализирует клиенту о доступности альтернативных сервисов, в частности HTTP/3 (h3):

```
h3=":443";ma=86400,h3-29=":443";ma=86400,h3-27=":443";ma=86400
```

Наличие такого заголовка подтверждает, что сервер способен обрабатывать запросы по данному протоколу. Другие заголовки предоставляют дополнительную информацию о статусе запроса, размере документа, сервере, времени обслуживания и особенностях инфраструктуры (например, информация о кэширующих прокси-серверах Varnish).

Полученная клиентом HTML-страница содержит сообщение о поддержке HTTP/3 соединения, представляя собой простейшую структуру HTML с CSS-стилями и встроенным видео контентом. Несмотря на то, что наш клиент не является браузером, страница является простым визуальным индикатором успеха. И хотя клиент не воспроизводит видео, сама вставка элемента с параметром `autoplay` доказывает возможность передавать медиа данные по HTTP/3.

Надо отметить, что результат подключения к `http3.is` с помощью Google Chrome или MS Edge может иметь вид, как в левой части рис. 3. Это значит, что ваш браузер ещё не включил поддержку HTTP/3 для конкретного домена или настройки браузера ограничивают использование экспериментальных функций, включая HTTP/3. Поэтому соединение было установлено по старому стандартному протоколу HTTP/1.x или HTTP/2.

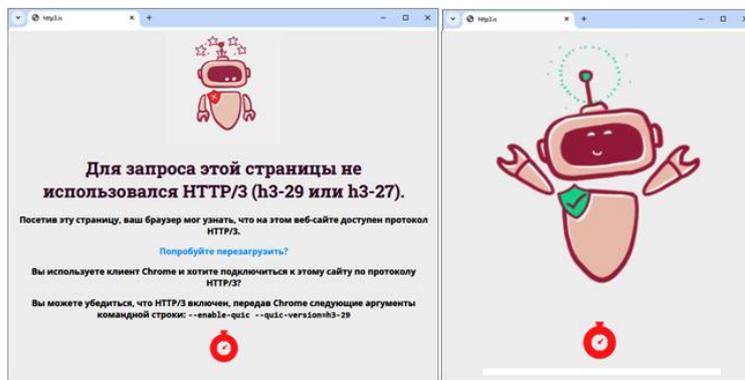


Рисунок 3. Результаты подключения к `http3.is` с помощью MS Edge.

Figure 3. Results of connecting to `http3.is` using MS Edge.

Поскольку HTTP/3 является относительно новым стандартом, многие браузеры поддерживают его лишь частично или требуют специальной активации через настройки или использования аргументов командной строки:

```
start msedge --new-window --enable-quit --quit-version=h3-29 http://http3.is
```

В этом случае результат подключения будет иметь вид, как в правой части рис. 3. Такой же результат можно обеспечить, если из HTML-страницы, полученной нашим HTTP/3-клиентом, определить путь к видеоконтенту сайта:

```
https://http3.is/robot_http3_success_v3.mp4
```

Таким образом, можно сделать вывод, что описанный выше HTTP/3-клиент успешно установил соединение с сервером, получил и обработал заголовки, корректно извлек и распознал содержание страницы. Это свидетельствует о полной функциональности разработанной реализации HTTP/3-клиента.

4. Анализ взаимодействия по HTTP/3. Для проведения анализа взаимодействия HTTP/3-клиента с сервером надо выполнить захват пакетов, циркулирующих между этими хостами. Для этого достаточно запустить Wireshark, установить фильтр захвата `udp.port == 443`, активировать работу HTTP/3-клиента и сохранить результаты захвата в файле (например, `h3_quic.pcapng`). Однако полная расшифровка HTTP/3 пакетов в Wireshark требуют правильной настройки протокола шифрования и соответствующих ключей для раскрытия содержимого трафика.

Для успешной расшифровки HTTP/3-пакетов потребуются ключи шифрования (TLS Session Key). Чтобы их сохранить, надо HTTP/3-клиента настроить так, чтобы он обеспечивал запись сессионных

ключей в нужный нам файл, например h3_keys.log. Для этого в Python-код клиента надо добавить строку, в которой будет указан файл, куда надо сохранять сессии с ключами шифрования.

```
cfg.secrets_log_file = open("h3_keys.log", "w")
```

Для импорта этого файла в среду Wireshark следует перейти в меню Edit → Preferences → Protocols → TLS и в поле RSA keys list указать полный путь доступа к файлу h3_keys.log. Если всё настроено правильно, то пакеты HTTP/3 из файла h3_quic.pcapng будут успешно расшифрованы, показывая содержимое запросов и ответов (рис. 4).

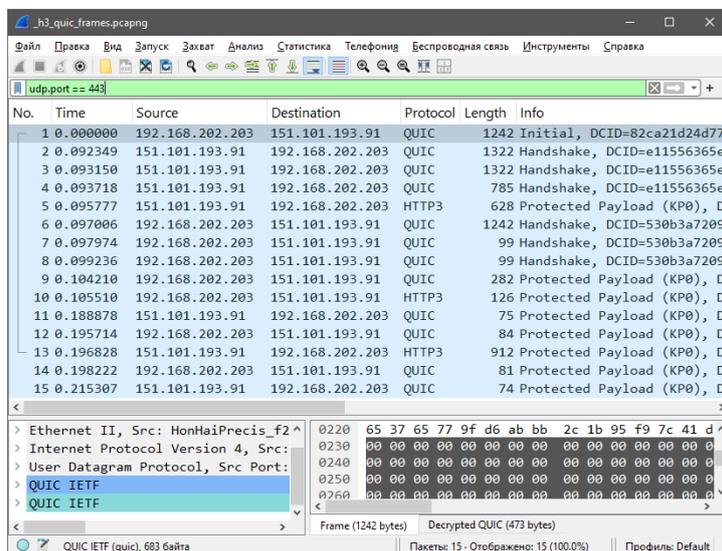


Рисунок 4. Результат захвата HTTP/3 и QUIC пакетов в среде Wireshark.

Figure 4. Result of capturing HTTP/3 and QUIC packets in Wireshark.

В Wireshark различие в отображении пакетов как HTTP/3 (пакеты 5, 10, 13) и QUIC (остальные) связано с фундаментальными особенностями работы этих протоколов и способом их анализа. Причина различий в том, что QUIC – это транспортный протокол (аналог TCP), а HTTP/3 – прикладной протокол, работающий поверх QUIC. Поэтому Wireshark показывает QUIC – когда анализирует транспортный уровень (установка соединения, АСК, криптография) и HTTP/3 – когда расшифровывает прикладные данные (HTTP-запросы/ответы).

Рассмотрим детально, как происходит взаимодействие между клиентом и сервером на примере реального соединения с сайтом http3.is (рис. 5).

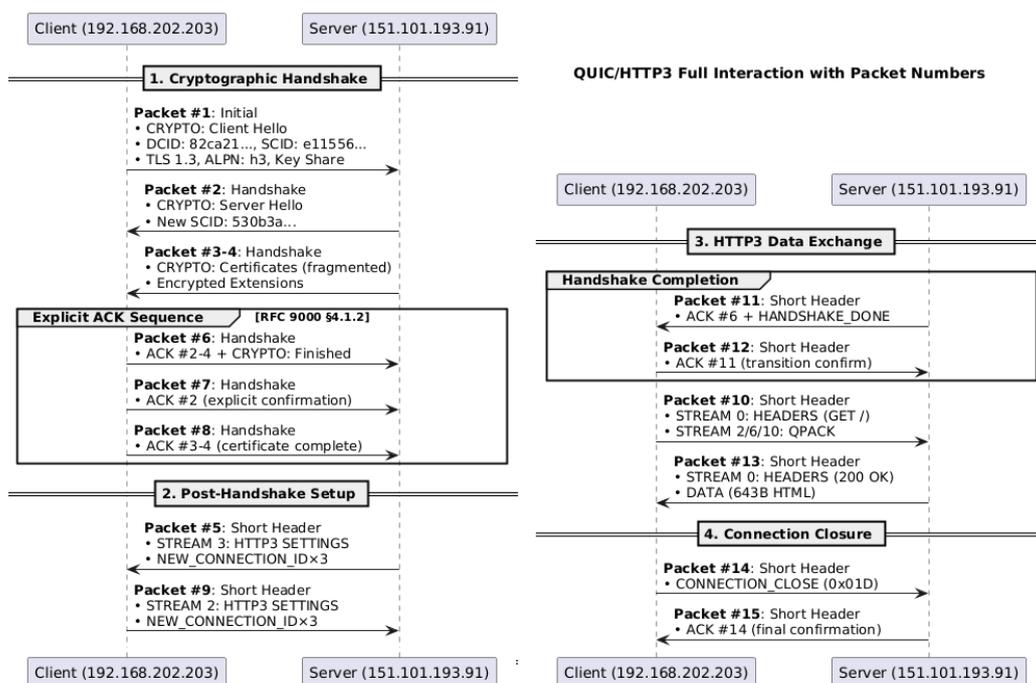


Рисунок 5. Взаимодействие по HTTP/3 и QUIC с указанием номеров пакетов.

Figure 5. HTTP/3 and QUIC interaction with packet numbers indicated.

Фаза 1. Инициализация защищенного канала. Процесс начинается с формирования клиентом Initial-пакета (#1 Client Hello), содержащего криптографические параметры TLS 1.3. В отличие от классического TLS-over-TCP, QUIC инкапсулирует handshake в CRYPTO-фреймы, сразу устанавливая идентификаторы соединения (DCID/SCID).

Сервер последовательно отвечает тремя пакетами (#2-4): сначала передает Server Hello с выбранными криптографическими параметрами, затем фрагментированные сертификаты и расширения. Особенность QUIC проявляется в обязательных явных подтверждениях — клиент отправляет серию ACK (#6-8), причем каждый пакет подтверждает конкретный этап: #6 фиксирует получение Server Hello, #7 и #8 детально подтверждают доставку всех фрагментов сертификатов. Такая детализация обеспечивает надежность, отсутствующую в TCP, где подтверждения встроены в общий поток данных.

Фаза 2. Настройка после рукопожатия. После установки криптографического контекста сервер инициирует настройку прикладного уровня через пакет #5, содержащий HTTP/3 SETTINGS и новые идентификаторы соединения (NEW_CONNECTION_ID). Это позволяет в дальнейшем осуществлять миграцию соединения без разрыва. Клиент зеркально отвечает собственными настройками в пакете #9, включая параметры QPACK для сжатия заголовков. Критическим моментом становится обмен пакетами #11-12, когда сервер сигнализирует о завершении handshake через HANDSHAKE_DONE, а клиент явным ACK подтверждает готовность к передаче данных. Эта двухэтапная верификация исключает состояние гонки (race condition), возможной в традиционных стеках. То есть исключает ситуацию, когда клиент и сервер могут начать передачу данных до того, как обе стороны полностью подтвердят завершение криптографического рукопожатия.

Фаза 3. Обмен прикладными данными. Переход к HTTP/3 взаимодействию начинается с пакета #10, где клиент формирует двунаправленный поток (Stream 0) с HTTP-заголовками GET-запроса, параллельно инициализируя служебные потоки для QPACK. Сервер отвечает компактным пакетом #13, объединяющим заголовок 200 OK и данные HTML-страницы в одном фрейме DATA — это демонстрирует преимущество мультиплексирования QUIC, исключающего блокировки "головы очереди". Особенность HTTP/3 проявляется в явном разделении управляющих потоков (STREAM 2,3) и данных приложения (STREAM 0), что обеспечивает детерминированную обработку.

Фаза 4. Закрытие соединения. Оно инициируется клиентом через CONNECTION_CLOSE (#14) с кодом приложения 0, обозначающим штатное завершение. Сервер подтверждает разрыв пакетом #15, следуя принципу явных подтверждений. В отличие от TCP с его состояниями TIME_WAIT, QUIC сразу

освобождает ресурсы, сохраняя при этом гарантию доставки финальных пакетов благодаря механизму ACK.

Архитектура QUIC/HTTP3 демонстрирует принципиально новый подход к организации сетевого взаимодействия. При таком подходе криптография, надежность и прикладная семантика интегрированы в единую согласованную модель. Каждая фаза взаимодействия подчеркивает преимущества протокола: от обязательных подтверждений на транспортном уровне до эффективного мультиплексирования на прикладном, что в совокупности формирует устойчивую систему для современных веб-приложений.

5. Анализ использование Connection ID в QUIC. Протокол QUIC радикально меняет подход к идентификации соединений, заменяя привычные IP-портовые привязки динамическими Connection ID (CID). В отличие от TCP, где соединение жестко связано с парой (IP, порт), QUIC позволяет гибко менять CID в процессе работы, обеспечивая устойчивость к изменениям сетевых условий. Рассмотрим ключевые аспекты применения CID на примере взаимодействия между HTTP/3 клиентом и сервером (151.101.193.91).

В QUIC каждый участник соединения генерирует свои CID, которые используются для маршрутизации пакетов. В анализируемом примере клиент в пакете #1 (Client Hello) указывает DCID (Destination Connection ID) = 82ca21... и SCID (Source Connection ID) = e11556... . Сервер в ответе (Server Hello) заменяет SCID на новый (530b3a...). Это демонстрирует динамическую природу идентификаторов. Динамическая смена CID на ранней стадии (RFC 9000, раздел 5.1) предотвращает атаки повторного воспроизведения (replay attacks) и упрощает миграцию соединения при смене IP.

На фазе после handshake участники обмена могут инициировать ротацию CID посредством фреймов NEW_CONNECTION_ID (пакеты #5, #9), где сервер предоставляет клиенту набор из трёх новых идентификаторов. Данный механизм обеспечивает: во-первых, бесперебойную миграцию соединения при смене сетевых интерфейсов (например, с Wi-Fi на мобильную сеть) и, во-вторых, распределённую маршрутизацию через привязку различных CID к отдельным серверным узлам.

Декомпозиция логического соединения от логических параметров IP в QUIC достигается за счёт криптографически случайной генерации CID (напр. 530b3a...), что осложняет трассировку пользователей. Кроме этого, регулярная смена (например, после 100 пакетов) снижает риск корреляции трафика.

6. Анализ использования параллельных потоков. QUIC, как мультиплексирующий транспортный протокол, обеспечивает одновременную передачу данных через независимые потоки (streams). В отличие от TCP, где параллелизм требует нескольких соединений, QUIC позволяет мультиплексировать потоки в рамках одного соединения. На примере захваченного дампа (пакеты #10–13) продемонстрируем ключевые аспекты работы параллельных потоков. В анализируемом взаимодействии наблюдаются следующие потоки:

- Stream 0: Управляющий поток для служебных фреймов (HEADERS с HTTP-запросом GET / и ответом 200 OK).
- Streams 2, 6, 10: Потоки для QPACK (сжатие HTTP-заголовков).
- Stream 3: Передача SETTINGS (настройки HTTP/3).

В захваченном дампе пакетов в качестве основных признаки параллельной обработки можно выделить: одновременную передачу, независимость потоков и приоритизацию. Примером одновременной передачи будет ситуация, когда клиент отправляет HTTP-запрос (Stream 0) параллельно с QPACK-потоками (2,6,10), что подтверждает мультиплексирование. При этом сервер отвечает данными (Stream 0) без ожидания завершения QPACK-потоков.

Независимость потоков заключается в том, что потеря пакета в Stream 2 не блокирует Stream 0 (в отличие от TCP, где применяется единая очередь). Потоки используют общий CID, но имеют уникальные идентификаторы. А свойство приоритизации характеризуется тем, что Stream 0 (управляющий) обрабатывается первым, несмотря на наличие других активных потоков.

Преимущества параллелизма в QUIC: во-первых, нулевая блокировка head-of-line (HOL) – каждый поток обрабатывается независимо; во-вторых, эффективность ресурсов – одно соединение заменяет множество TCP-соединений; в-третьих, гибкость – потоки могут динамически создаваться/закрываться (например, для загрузки JS/CSS/медиа).



Рисунок 6. Сравнение параллельной обработки потоков в QUIC и TCP

Figure 6. Comparison of parallel stream processing in QUIC and TCP

Таким образом, анализ захваченного дампа пакетов подтверждает, что QUIC реализует истинный параллелизм через мультиплексирование (совместная работа Stream 0, 2, 6, 10), независимую обработку (отсутствие блокировки QPACK-потоков) и оптимизированное управление (приоритет Stream 0).

Заключение. Проведённое исследование подтвердило значительные преимущества протоколов HTTP/3 и QUIC перед традиционными решениями на основе TCP/TLS. Реализация Python-клиента с использованием библиотеки aioquic и анализ трафика в Wireshark позволили наглядно продемонстрировать такие ключевые особенности, как интеграция криптографии на транспортном уровне, динамическая идентификация соединений через Connection ID и отсутствие блокировки головной части очереди (HOL blocking). Успешная расшифровка трафика и верификация соответствия стандартам RFC 9114 и RFC 9000 подчеркивают практическую применимость HTTP/3 для современных сетевых приложений.

Отдельного внимания заслуживают инструменты моделирования сетевых взаимодействий, такие как OMNeT++, которые позволяют исследовать поведение протоколов в контролируемых условиях. В работе [6] показано применение OMNeT++ для анализа беспроводных Wi-Fi сетей, что может быть полезно для сравнительных исследований с QUIC в условиях беспроводных сред.

Результаты данной работы могут быть полезны разработчикам и администраторам, стремящимся оптимизировать производительность и безопасность веб-инфраструктур. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение эффективности QUIC в условиях высокой нагрузки и нестабильных сетевых условий, включая беспроводные среды

Список использованных источников

1. Nottingham, M., McManus, P. (2022). HTTP/3. RFC 9114. DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC9114>
2. Tüxen, M., Ed., Scheffenegger, R., Ed., & Jesup, R., Ed. (2021). QUIC Transport Protocol Specification. RFC 9000. DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC9000>
3. IETF QUIC Working Group. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. [Электронный ресурс] URL: <https://datatracker.ietf.org/wg/quic/> (дата обращения: 06.07.2025).
4. AIOQuic: QUIC and HTTP/3 implementation for Python / J. Bernard, A. Roza et al. [Электронный ресурс] URL: <https://github.com/aiortc/aioquic> (дата обращения: 06.07.2025).
5. Хабаров С. П. Анализ взаимодействия узлов по протоколу QUIC // Современные научно-технические достижения современности: новые технологии, инновационные решения: сборник научных статей. – Ульяновск: Зебра, 2025. – С. 34-39
6. Думов, М. И. Использование OMNET++ для моделирования беспроводных Wi-Fi сетей / М. И. Думов, С. П. Хабаров // Информационные системы и технологии: теория и практика: Сборник

научных трудов. Том Выпуск 10. Часть 1. – СПб: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2018. – С. 44-53. – EDN XUKMYX.

Reference

1. Nottingham, M., McManus, P. (2022). HTTP/3. RFC 9114. DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC9114>
2. Tüxen, M., Ed., Scheffenegger, R., Ed., & Jesup, R., Ed. (2021). QUIC Transport Protocol Specification. RFC 9000. DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC9000>
3. IETF QUIC Working Group. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. [Electronic resource] URL: <https://datatracker.ietf.org/wg/quic/> (accessed: 06.07.2025).
4. AIOQuic: QUIC and HTTP/3 implementation for Python / J. Bernard, A. Roza et al. [Electronic resource] URL: <https://github.com/aiortc/aioquic> (date of access: 06.07.2025).
5. Khabarov S. P. Analysis of node interaction via the QUIC protocol // Modern scientific and technical achievements of our time: new technologies, innovative solutions: a collection of scientific articles. - Ulyanovsk: Zebra, 2025. - Pp. 34-39
6. Dumov, M. I. Using OMNET++ for modeling wireless Wi-Fi networks / M. I. Dumov, S. P. Khabarov // Information systems and technologies: theory and practice: A collection of scientific papers. Volume Issue 10. Part 1. - St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, 2018. – P. 44-53. – EDN XUKMYX.

ANALYSIS OF HTTP/3 AND QUIC INTERACTION USING A PYTHON CLIENT AND WIRESHARK

Habarov Sergey P.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Department of Information Systems and Technologies,
Institute of forestry and nature management
Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov,
Saint-Petersburg
E-mail: serg.habarov@mail.ru

Vagizov Marsel R.^{1,2}

¹Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Head of the Department of Information Systems and Technologies.
Institute of forestry and nature management
Saint-Petersburg State Forest technical University named after S. M. Kirov,
²professor of the department information technologies and security systems,
Institute of information systems and geotechnology
Russian state hydrometeorological university
Saint-Petersburg
E-mail: bars-tatarin@yandex.ru

© Хабаров С.П., Вагизов М. Р. 2025

УДК 004.8

Мартын К.А., Мартын И.А.
**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СЕРИЙ
МОДЕЛИ YOLOV8 ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЛЕСНОГО МАССИВА**

Мартын Кристина Андреевна

Ассистент кафедры Информационных систем и технологий

Институт леса и природопользования

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова

Санкт-Петербург

E-mail: martynchris@mail.ru

Мартын Ирма Андреевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры Прикладной информатики

Институт информационных систем и геотехнологий

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет

Санкт-Петербург

E-mail: irma_martyn@mail.ru

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ серий YOLOv8 (small, medium, large) для классификации объектов лесного массива Ленинградской области на аэроснимках за период 4 октября 2024г. Результаты показали компромисс между скоростью на 100 эпох и точностью (mAP 0.25-0.42), где large-версия оптимальна для реального времени, а small — для точной детекции. Исследование подтверждает эффективность YOLOv8 для экологического мониторинга даже при ограниченном датасете.

Ключевые слова: YOLOv8, классификация объектов, лесной массив, mAP, скорость обработки.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF DIFFERENT SERIES OF YOLOV8 MODELS FOR
CLASSIFICATION OF FOREST OBJECTS**

Abstract. The article provides a comparative analysis of the YOLOv8 series (small, medium, large) for classifying objects of the Leningrad region forest on aerial photographs for the period October 4, 2024. The results show a trade-off between speed per 100 epochs and accuracy (mAP 0.25-0.42), where the large version is optimal for real time, and the small version is for accurate detection. The study confirms the effectiveness of YOLOv8 for environmental monitoring even with a limited dataset.

Keywords: YOLOv8, object classification, forest area, mAP, processing speed.

Введение. Современные технологии компьютерного зрения, в частности модели семейства YOLO (You Only Look Once), играют ключевую роль в задачах детекции и классификации объектов на изображениях и видео. С момента своего появления архитектура YOLO претерпела значительные изменения, и последняя версия — YOLOv8 — демонстрирует существенные улучшения в точности и скорости обработки данных [1]. Эти характеристики делают её востребованной в различных областях, включая экологический мониторинг, сельское хозяйство и управление природными ресурсами [2].

Особый интерес представляет применение YOLOv8 для анализа лесных массивов, где требуется оперативная и точная классификация объектов, таких как деревья, дороги и водные объекты, на снимках с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Однако выбор конкретной серии модели (Small, Medium, Large) зависит от компромисса между скоростью обработки и точностью, что особенно актуально при работе с ограниченными вычислительными ресурсами [3].

Нейронные сети модели YOLO активно используются для детекции и классификации объектов на видео и изображениях. YOLOv8 - это новейшее семейство моделей обнаружения объектов на базе YOLO от Ultralytics, обеспечивающих самые современные характеристики. В каждой категории моделей YOLOv8 есть пять моделей для обнаружения, сегментации и классификации. YOLOv8 Nano - самый быстрый и маленький, в то время как YOLOv8 Extra Large (YOLOv8x) - самый точный, но самый медленный среди них [4].

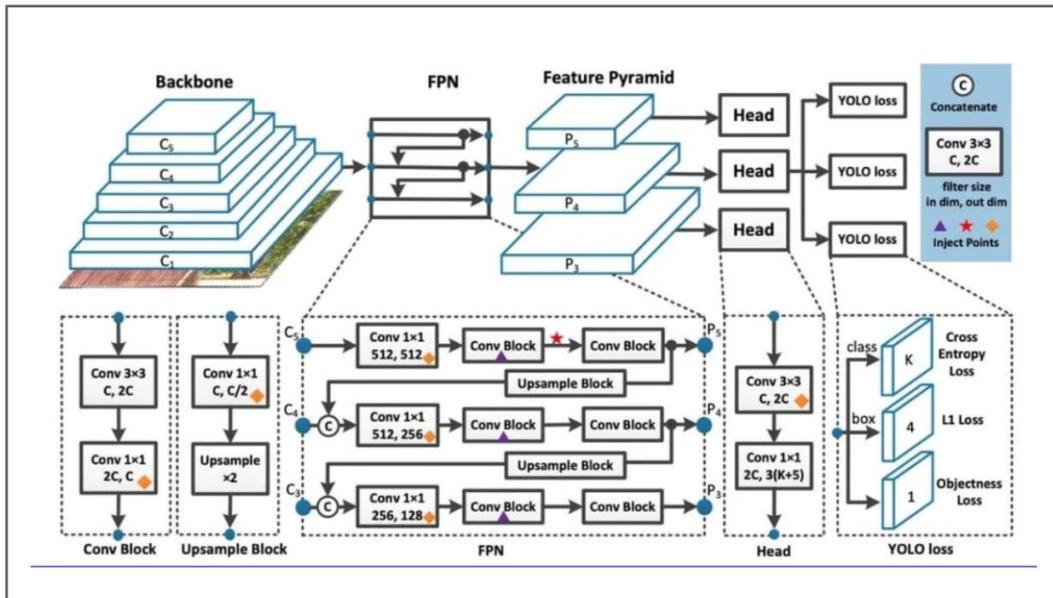


Рисунок 1. Архитектура YOLOv8

Figure 1. YOLOv8 architecture

Обнаружение объектов включает в себя выявление и поиск интересных объектов на изображении или видео. Традиционные методы часто полагались на подходы к выдвигаемым окнам, которые были вычислительно дорогими и медленными. YOLO произвел революцию в этой области, рассматривая обнаружение объектов как проблему единой регрессии.

Вместо скользящих окон YOLO предсказывает ограничивающие рамки и вероятности классов для объектов непосредственно из входного изображения за один прямой проход, что значительно ускоряет процесс [5].

Архитектуру YOLOv8 можно условно разделить на три основных компонента:

- **Backbone:** Это сверточная нейронная сеть (CNN), отвечающая за извлечение функций из входного изображения. YOLOv8 использует пользовательскую магистраль CSPDarknet53, которая использует межступенчатые частичные соединения для улучшения потока информации между слоями и повышения точности.
- **Neck:** Neck, также известная как экстрактор признаков, объединяет карты признаков с разных этапов позвоночника для захвата информации в различных масштабах. Архитектура YOLOv8 использует новый модуль C2f вместо традиционной сети Pyramids (FPN). Этот модуль сочетает в себе высокоуровневые семантические особенности с низкоуровневой пространственной

информацией, что приводит к повышению точности обнаружения, особенно для небольших объектов.

- **Chapter:** Руководитель отвечает за прогнозы. YOLOv8 использует несколько модулей обнаружения, которые предсказывают ограничивающие рамки, показатели объектности и вероятности класса для каждой ячейки сетки на карте признаков. Затем эти прогнозы агрегируются для получения окончательных обнаружений [6].

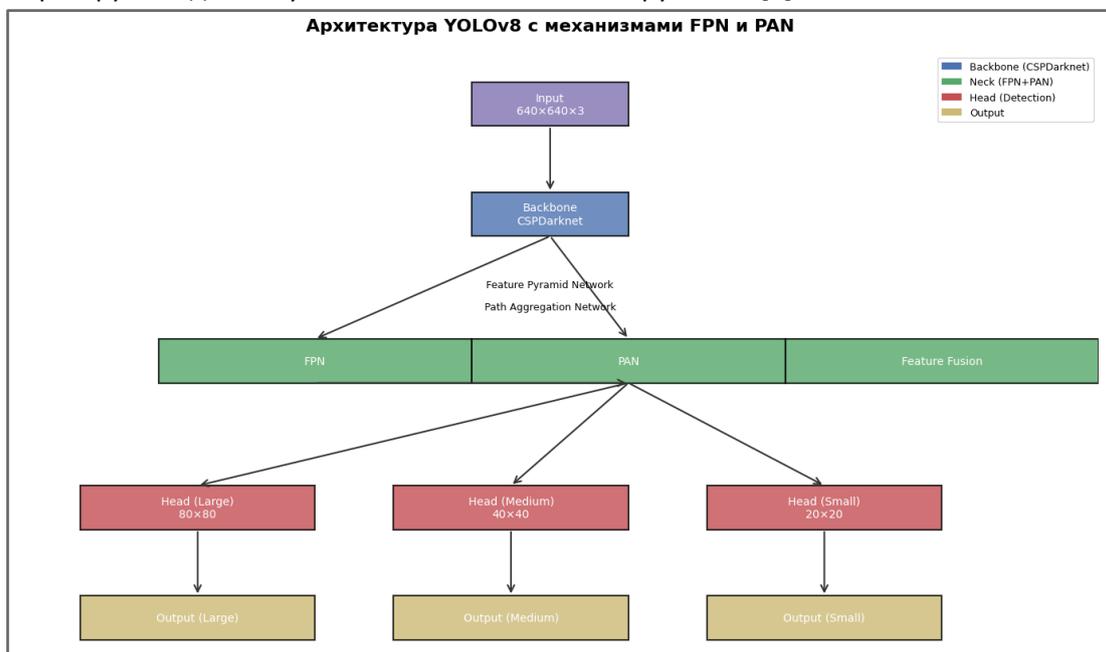


Рисунок 2. Три компонента архитектуры YOLOv8

Figure 2. Three components of the YOLOv8 architecture

Также стоит отметить, что YOLOv8 использует расширенные функции потерь для дальнейшего улучшения своих прогнозов. Для прогнозирования коробки обычно используется потеря CIOU или DIOU, которая вычисляет перекрытие, в дополнение к выравниванию расстояния и размера.

Для классификации объектов (т.е. обнаружения объектов) он использует стандартную перекрестную энтропию или эквивалентные потери на основе softmax. Вместе эти функции позволяют YOLOv8 эффективно учиться и генерировать стабильные результаты, такие как небольшие, закрытые или труднообнаружимые объекты [7].

Развитие моделей данной архитектуры происходит и в настоящее время. Модель YOLO версии 8 имеет значительно улучшенные результаты детекции по сравнению с другими версиями. Рассматриваемая модель имеет несколько серий - нано, маленькая, средняя, большая и мега большая. Серии этой модели отличаются точностью обнаружения объектов и скоростью производительности.

Выбор определенной модели зависит от поставленной задачи, производительности используемой техники. Рассмотрим стандартный пример по классификации объектов на изображении без использования больших технических мощностей. В качестве исходных данных, на которых будет обучена модель различных серий YOLOv8, используются фотографические снимки с беспилотного летательного аппарата лесного участка Ленинградской области (рис.3). Обучение и запуск модели нейросети по классификации объектов лесного массива будет производиться с использованием Google Colab с GPU T4. Для более качественного обучения нейросети требуется собрать датасет большого объема, но, чем больше набор данных, тем больше необходимо затратить времени на запуск модели и соответственно получение первых результатов для оценки результатов классификации или детекции [6].

Основная задача оценка производительности различных серий модели версии 8 на одном устройстве с пользовательским датасетом, отобранном для обучения нейросети по породной классификации деревьев. Набор данных содержит аннотированные изображения (рис.4.), полученные с беспилотных летательных аппаратов. Набор данных содержит 50 изображений. Дополнительно, все изображения прошли предварительную предобработку: масштабирование снимков до размера 320x320 пикселей, аугментацию в виде поворота изображений датасета на 15 градусов, что увеличивает исходный набор данных. Представленный датасет в дальнейшем разделен по стандартному принципу на обучающую, валидационную и тестовую выборку (70/20/10%). Для сравнения производительности различных серий YOLOv8 обучение каждой модели проводилось в течение 100 эпох, что обеспечило сопоставимые условия оценки.



Рисунок 3. Пример исходного изображения лесного массива по данным БПЛА

Figure 3. Example of the original image of a forest area based on UAV data



Рисунок 4. Пример аннотированных данных лесного массива

Figure 4. Example of annotated forest data

Оцениваются точность обнаружения объектов, анализируя метрику mAP, и скорость работы модели для трех наиболее популярных серий YOLOv8 - small (маленькая), medium (средняя), large (большая).

При использовании серии large скорость обучения по 100 эпохам произведено за 9 минут (1.7 ms на изображение). Средняя точность mAP составляет 0.25 - неплохой показатель для модели данной архитектуры (метрика не должна превышать 0.5). Mediuml модель выполняет обучение за 9.5 минут (2.0 ms на изображение) и со средней точностью примерно 0.31. Small серия модели YOLO 10 минут

(2.7 ms на изображение) затрачено на обучение модели, а точность модели в среднем 0.42. Анализ производительности моделей на датасете изображений представлен на рисунке 5.

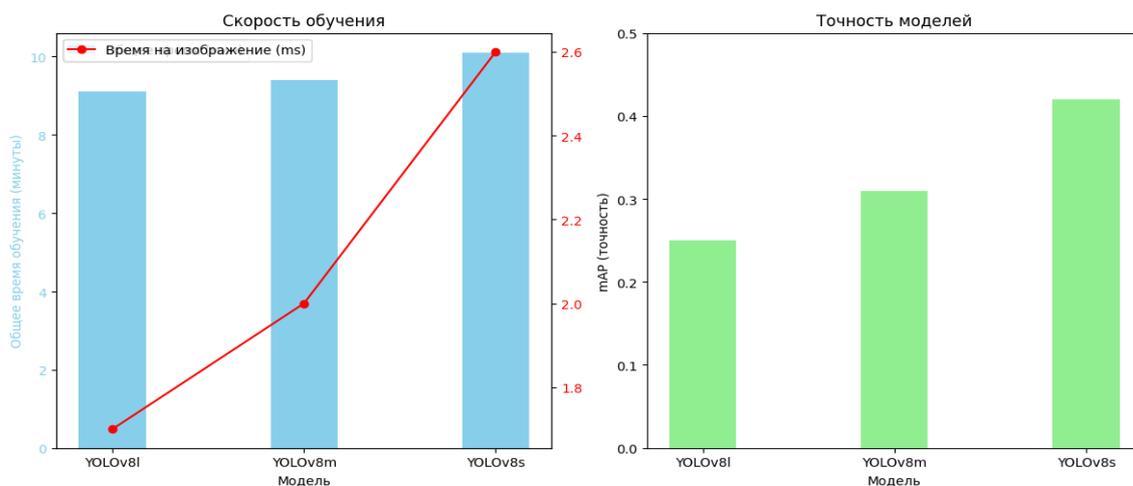


Рисунок 5. Анализ производительности различных вариантов модели YOLOv8.

Figure 5. Performance analysis of different variants of the YOLOv8 model.

Анализируя результаты классификации деревьев, полученные помощью различных серий модели отметим, что результаты идентичны друг другу. Отдельные объекты попадают при обработке моделью в один класс. Сравнить результаты работы нейронной сети архитектуры YOLOv8 различных серий можно на рисунках ба–в.

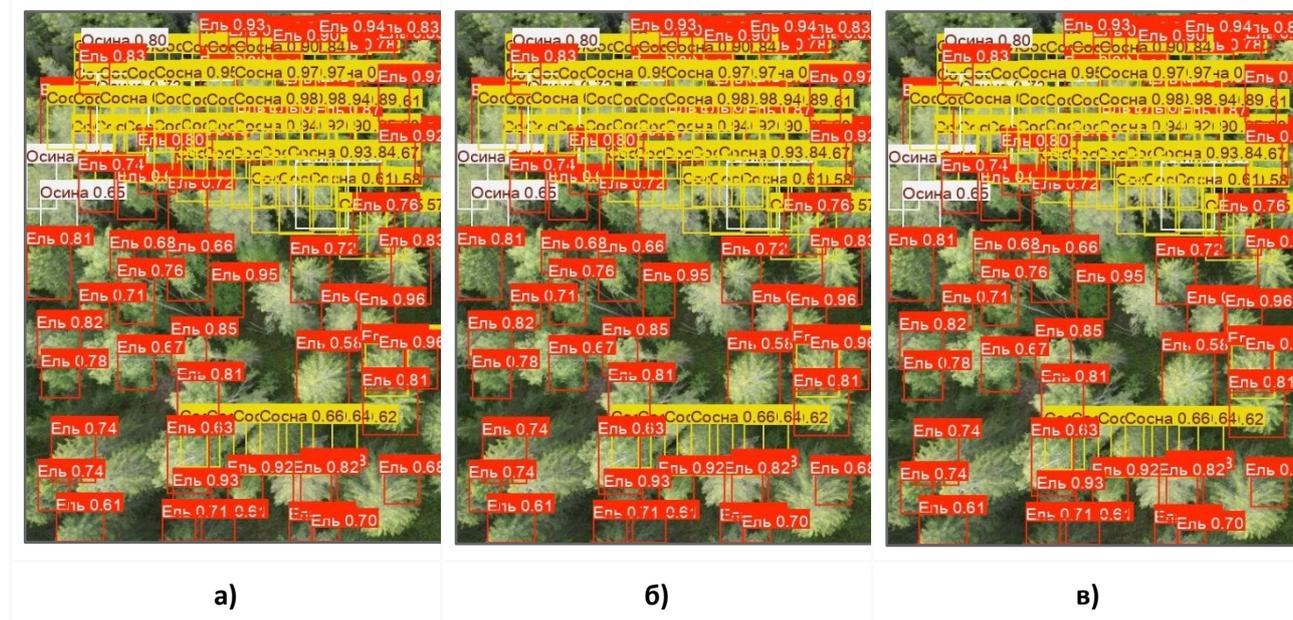


Рисунок 6. Результаты классификации деревьев на участке по трем сериям модели YOLOv8.

Figure 6. Results of tree classification on the plot according to three series of the YOLOv8 model.

Модель YOLOv8 подтвердила свою эффективность для классификации объектов лесного массива, а выбор серии зависит от требований проекта. Исследование подчеркивает важность баланса между скоростью и точностью при работе с нейросетевыми моделями в условиях ограниченных ресурсов.

Заключение. Проведенное исследование позволило всесторонне оценить эффективность различных серий модели YOLOv8 при решении задачи классификации объектов лесного массива.

Полученные результаты наглядно демонстрируют существующий компромисс между скоростью обработки данных и точностью детекции, характерный для современных нейросетевых архитектур. Серия Large показала наилучшие временные характеристики, что делает её предпочтительным выбором для систем реального времени, таких как мониторинг с использованием БПЛА. В то же время серия Small продемонстрировала более высокую точность при незначительном увеличении времени обработки, что может быть критически важным для аналитических задач, требующих максимальной достоверности результатов. Особого внимания заслуживает факт схожести качества классификации между всеми тестируемыми сериями, что свидетельствует о стабильности работы алгоритма YOLOv8 даже в условиях ограниченного обучающего набора данных. Проведенный эксперимент подтверждает гибкость и адаптивность данной архитектуры, позволяя выбирать оптимальную конфигурацию модели в зависимости от конкретных требований проекта. Полученные выводы имеют практическую ценность для специалистов в области дистанционного зондирования и экологического мониторинга, а также открывают перспективы для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию работы нейросетевых моделей в условиях изменяющейся окружающей среды и разнообразных погодных условий. Результаты работы подчеркивают важность комплексного подхода к выбору нейросетевых решений, учитывающего как технические ограничения, так и специфику решаемых прикладных задач.

Список использованных источников

1. Мартын, И. А. Автоматизация процесса учета площади леса с применением методов машинного обучения и ИИ / И. А. Мартын, К. А. Мартын // Информационные системы и технологии: Сборник научных трудов. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2025. – С. 131-133. – EDN WIBGDW.
2. Десктопное приложение для автоматизированной геопривязки данных дистанционного зондирования Земли / К. А. Мартын, В. Д. Троицкий, В. А. Лобачева, М. Р. Вагизов // Сборник научных трудов Совета молодых учёных СПбГЛТУ: Сборник статей. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2024. – С. 81-86. – EDN YIKLYQ.
3. Жовнеров, Н. С. Дешифрирование древесных растений на основе метода искусственного интеллекта «YOLO» / Н. С. Жовнеров, М. Р. Вагизов // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 22–24 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2024. – С. 43-46. – EDN IYBPUH.
4. Мартын, И. А. Оценка изменения площади лесного массива Республики Коми / И. А. Мартын, Э. С. Ключина // Информационные системы и технологии : Сборник научных трудов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2025. – С. 127-130. – EDN SZBWJF.
5. Алгоритм распознавания крон деревьев по снимкам среднего разрешения для управления геоинформационными моделями лесных экосистем / М. Р. Вагизов, К. А. Витлев, А. И. Попов [и др.] // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем : Сборник докладов Четвертой Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 131-134. – EDN QFWUCX.
6. Ayrapetov, D. P. Analysis of Work of YOLO v.3 AND YOLO v.2 Neural Networks / D. P. Ayrapetov, B. Y. Buyanov // Proceedings of the International Conference Technology & Entrepreneurship in Digital Society (TEDS) : Proceedings of the International Conference, Moscow, 07 ноября 2018 года. – Moscow: Издательский дом "Реальная экономика", 2019. – P. 22-25. – EDN SMCYUH.
7. Мартын, К. А. Сегментация спутниковых изображений растительного покрова на основе теории распознавания образов / К. А. Мартын, И. А. Мартын // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 926-928.

Reference

1. Martin, I. A. Automation of the forest area accounting process using machine learning and AI methods / I. A. Martin, K. A. Martin // Information systems and technologies : Collection of scientific papers. – St. Petersburg : St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, 2025. – pp. 131-133. – EDN WIBGDW.
2. Desktop application for automated geolocation of Earth remote sensing data / K. A. Martin, V. D. Troitsky, V. A. Lobacheva, M. R. Vagizov // Collection of scientific papers of the Council of Young Scientists of St. Petersburg State Technical University : Collection of articles. – St. Petersburg : St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, 2024. – pp. 81-86. – EDN YIKLYQ.
3. Zhovnerov, N. S. Decryption of woody plants based on the method of artificial intelligence "YOLO" / N. S. Zhovnerov, M. R. Vagizov // Forests of Russia: politics, industry, science, education : Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, May 22-24, 2024. – Saint Petersburg: St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, 2024. pp. 43-46. – EDN IYBPUH.
4. Martin, I. A. Assessment of changes in the forest area of the Komi Republic / I. A. Martin, E. S. Klyushina // Information systems and technologies : Collection of scientific papers. – Saint Petersburg : Saint Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, 2025. – pp. 127-130.
5. An algorithm for recognizing tree crowns from medium-resolution images for managing geoinformation models of forest ecosystems / M. R. Vagizov, K. A. Vitlev, A. I. Popov [et al.] // Modeling and situational quality management of complex systems : Collection of reports of the Fourth All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18-22, 2023. – Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2023. – pp. 131-134. – EDN QFWUCX.
6. Ayrapetov, D. P. Analysis of Work of YOLO v.3 AND YOLO v.2 Neural Networks / D. P. Ayrapetov, B. Y. Buyanov // Proceedings of the International Conference Technology & Entrepreneurship in Digital Society (TEDS) : Proceedings of the International Conference, Moscow, November 07, 2018. – Moscow: Publishing House "Real Economy", 2019. – P. 22-25. – EDN SMCYUH.
7. Martin, K. A. Segmentation of satellite images of vegetation based on the theory of pattern recognition / K. A. Martin, I. A. Martin // Digital systems and models: theory and practice of design, development and application : Proceedings of the national (with international participation) scientific and practical conference, Kazan, April 10-11, 2024. – Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2024. – pp. 926-928. – EDN LETGGG.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF DIFFERENT SERIES OF YOLOV8 MODELS FOR CLASSIFICATION OF FOREST OBJECTS

Martyn K.A.

Assistant of the Department of Information Systems and Technologies
 Institute of forestry and nature management
 Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov,
 Saint Petersburg
 E-mail: martynchris@mail.ru

Martyn I.A.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Informatics
 Institute of information systems and geotechnology
 Russian State Hydrometeorological University
 Saint Petersburg
 E-mail: irma_martyn@mail.ru

©Мартын К.А., Мартын И.А. 2025

РАЗДЕЛ ГЕОЭКОЛОГИЯ

SECTION GEOECOLOGY

УДК 631.546; 630.1

Данилова Е. В.

ГИДРОПОННЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО (Часть 1)

Данилова Елизавета Вячеславовна

студент бакалавриата 2 курса

кафедра прикладной гидрометеорологии

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический Университет

Санкт-Петербург

E-mail: ncat787@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые аспекты гидропоники как современного способа выращивания растений. Проводится сравнительный анализ гидропонных технологий и традиционных методов сельского хозяйства по таким параметрам как водопотребление, урожайность, использование удобрений, требования к пространству и скорость роста растений. Статья также освещает различные типы гидропонных установок, их особенности и сферы применения.

Ключевые слова: гидропоника, гидропонные установки, сельское хозяйство, водопотребление, урожайность, экономия ресурсов, беспочвенное выращивание.

HYDROPONIC INSTALLATIONS AND THEIR IMPACT ON AGRICULTURE

Abstract. The article discusses the key aspects of hydroponics as a modern way of growing plants. A comparative analysis of hydroponic technologies and traditional agricultural methods is carried out according to such parameters as water consumption, yield, fertilizer use, space requirements and plant growth rate. The article also highlights various types of hydroponic installations, their features and applications.

Keywords: hydroponics, hydroponic installations, agriculture, water consumption, productivity, resource conservation, soil-free cultivation.

Введение. Современное сельское хозяйство сталкивается с множеством вызовов: истощение почв, нехватка воды, климатические изменения, рост населения и урбанизация. В таких условиях традиционные методы земледелия становятся менее эффективными, что стимулирует поиск альтернативных способов выращивания растений. Одним из наиболее перспективных направлений является гидропоника — метод культивирования растений без почвы, с использованием питательных растворов. Гидропоника (от греч. hydor – вода и ropos – работа) – инновационный метод выращивания растений без использования почвы, основанный на подаче питательных веществ непосредственно к корням.

Гидропонные технологии позволяют повысить урожайность, сократить расход воды и минимизировать использование пестицидов. В данной статье рассматриваются принципы гидропоники, виды установок, их влияние на сельское хозяйство, а также примеры успешного внедрения в разных странах.

Проблематика и актуальность гидропонных систем. Среди основных проблем сельского хозяйства можно выделить:

1. Деградация почв – из-за интенсивного земледелия и эрозии плодородный слой сокращается. По данным исследований около 33% мировых почв уже деградировали из-за эрозии, засоления и химического загрязнения или не подходят для земледелия [1]. Эта карта (Рис. 1) показывает преобладание углерода в верхнем слое почвы по сравнению с биомассой:

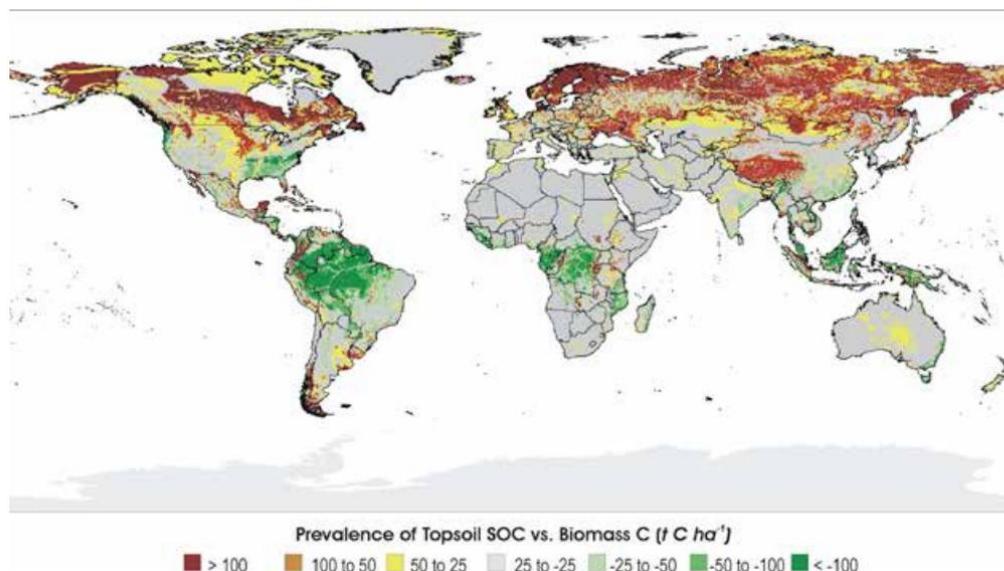


Рисунок 1. Карта преобладания углерода в верхнем слое почвы по сравнению с биомассой [1]

Figure 1. Map of prevalence of Topsoil carbon vs. Biomass [1]

Как известно, углерод очень важный компонент почвы, он является основным источником питательных веществ для растений, снижает вымывание удобрений, улучшают аэрацию, водопроницаемость и устойчивость к утоплению. Но по карте видно, что участков с большим содержанием углерода в мировых масштабах значительно меньше, чем тех, где его содержание мало. По данной карте (Рис. 2) видно преобладающий pH верхнего слоя почвы:

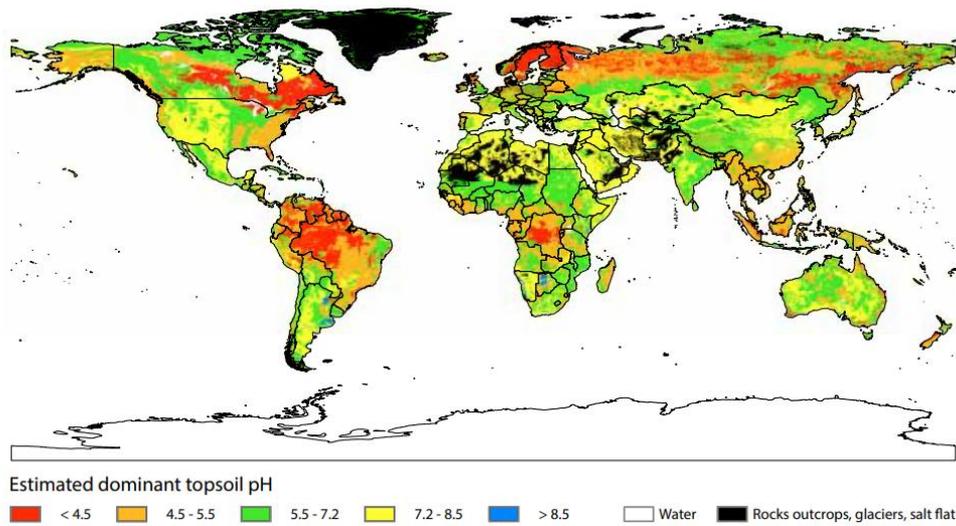


Рисунок 2. Карта преобладающей pH верхнего слоя [1]

Figure 2. Map of the dominant topsoil pH [1]

Это также показывает, насколько много участков земли засорены химикатами, что ведет к снижению урожайности и качества продукции. Наибольшая концентрация вредных веществ содержится в следующих странах: Бразилия и страны севера Южной Америки, Канада, Демократическая Республика Конго, Швеция, Финляндия и преобладающая часть России.

2. Дефицит воды – проблема нехватки воды для полива становится все более острой из-за избыточного потребления и неэффективного использования ее ресурсов в сельском хозяйстве, сельское хозяйство потребляет около 70% пресной воды (Рис. 3), но лишь 40% эффективно используется растениями [2], а также её запасы ограничены.

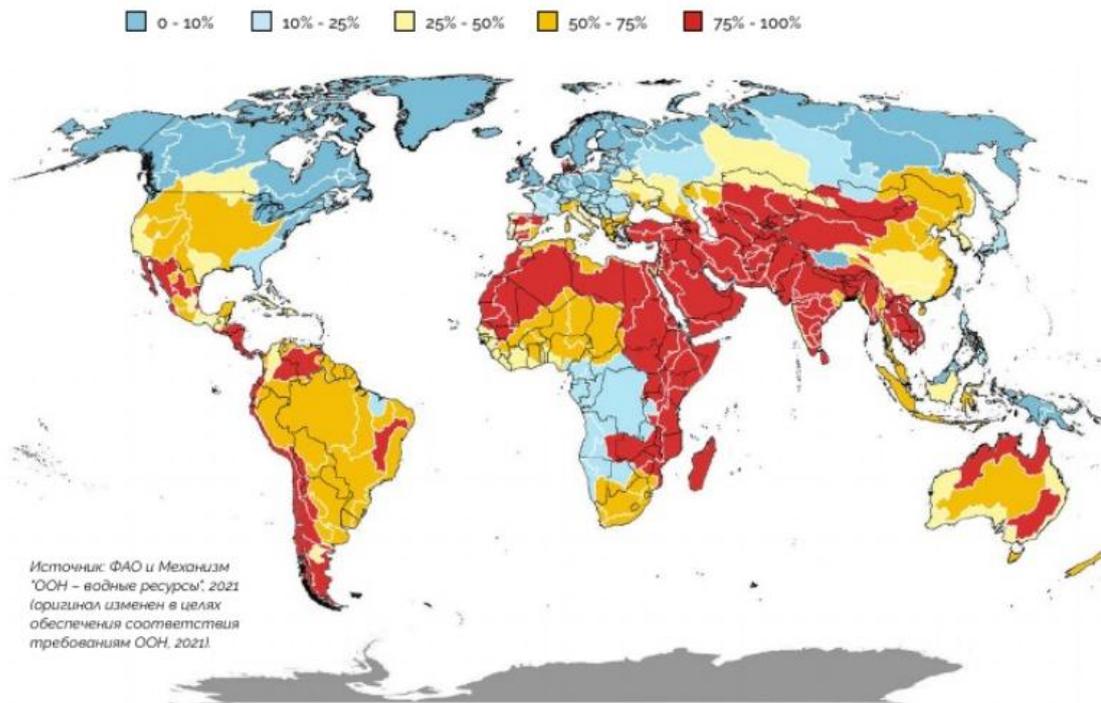


Рисунок 3. Карта процентов потребления воды для нужд сельского хозяйства [1]

Figure 3. Percentage map of water consumption for agriculture [1]

3. Изменение климата – засухи, наводнения и экстремальные температуры снижают урожайность.
4. Рост населения – к 2050 году численность населения достигнет 9,7 млрд, что потребует увеличения производства пищи на 60-70% [3].

Не решены проблемы дефицита воды в следующих странах: Страны севера и востока Африки (Сомали, Судан, Египет, Кении и др.), Ближнего Востока (Йемен, Ирак, Сирия), Южной Азии (Пакистан, части Индии), а также засушливые регионы Мексики, Перу и Австралии, общая численность населения которых составляет около 2–3 миллиардов человек, что может запустить негативные процессы следующего характера: опустынивание, голод, миграции, рост цен на продовольствие.

Почему гидропоника актуальна? Гидропонные системы предлагают решения части обозначенных проблем:

- Экономия воды – до 90% по сравнению с традиционным земледелием.

Таблица 1 - Сравнение водопотребления для выращивания

Table 1 - Comparison of water consumption for cultivation

Метод выращивания	Расход воды (л/кг урожая)
Традиционный (почва)	500–5,000
Гидропоника	50–200

- Независимость от почвы – возможность выращивания в засушливых и урбанизированных регионах.
- Контроль условий – оптимальное питание, освещение и микроклимат повышают урожайность.
- Сокращение пестицидов – закрытые системы снижают риск заражения вредителями.

Также с развитием долгосрочных космических программ, вопрос обеспечения астронавтов свежей пищей становится критически важным. Гидропоника рассматривается как ключевая технология для создания устойчивых систем жизнеобеспечения в условиях ограниченных ресурсов космоса. Традиционные методы доставки пищи на орбиту крайне затратны, сократить зависимость от земных поставок позволяет выращивание зелени, овощей и даже зерновых культур непосредственно на станции с помощью гидропонии. Обеспечение свежими витаминами предотвращает авитаминоз у экипажа.

Принцип работы гидропонных установок. Гидропоника основана на подаче к корням растений питательного раствора, содержащего все необходимые макро- и микроэлементы. В зависимости от типа системы, корни могут находиться:

- В воде.
- В инертном субстрате.
- В воздушной среде.

Основные компоненты гидропонной установки:

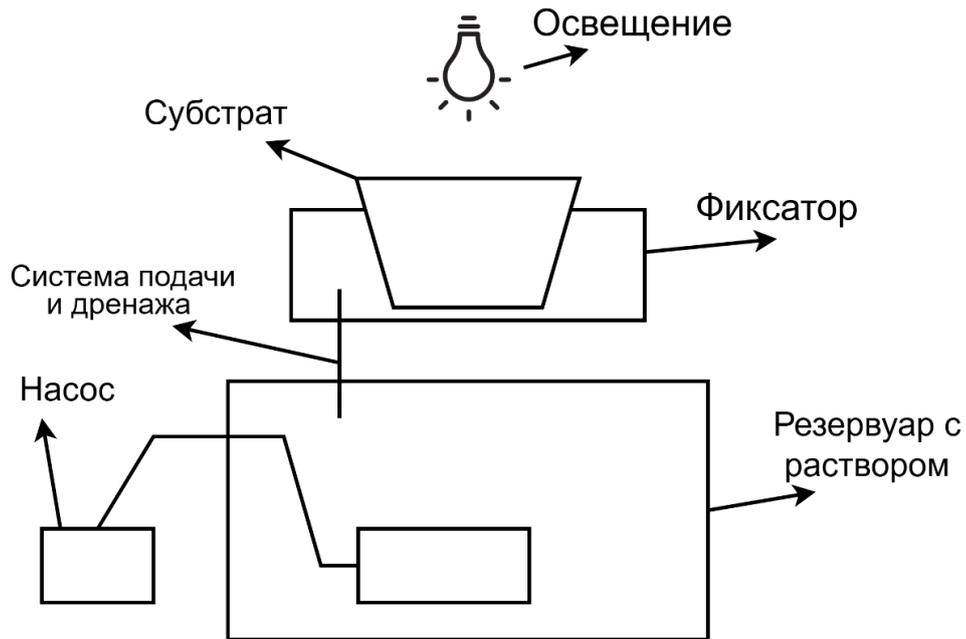


Рисунок 4. Общая схема гидропонной установки
Figure 4. General scheme of the hydroponic installation

- Резервуар – содержит питательный раствор.
- Насос – обеспечивает циркуляцию раствора.
- Система подачи и дренажа – доставляет и отводит раствор.
- Субстрат или фиксаторы – поддерживают растения.
- Освещение (если выращивание в помещении).

Виды гидропонных систем. Существует несколько основных типов гидропонных установок:

Фитильная система (Wick System) – самая простая и дешевая.

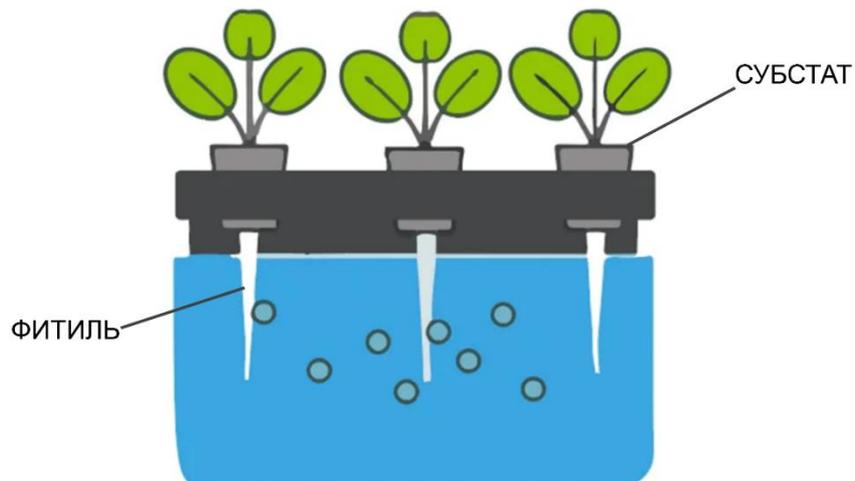


Рисунок 5. Устройство фитильной системы [4].

Figure 5. The device of the wick system [4].

Устройство: Растения находятся в субстрате (перлит, вермикулит). Фитили (капроновые или хлопковые) опущены в резервуар с раствором. Капиллярный эффект обеспечивает подачу влаги к корням (Рис. 5).

Плюсы:

- Нет насосов – не зависит от электричества.
- Дешевая и простая в сборке.

Минусы:

- Подходит только для небольших растений (салат, травы).
- Медленная подача питания – неэффективна для крупных культур.

Эффективность: низкая (урожайность меньше, чем в активных системах).

Система глубоководных культур (DWC, Deep Water Culture)

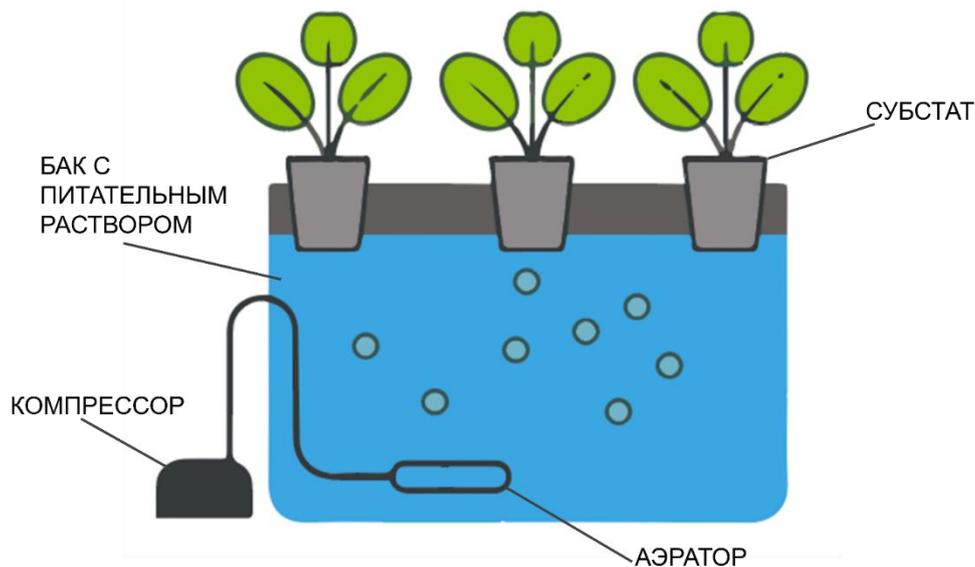


Рисунок 6. Устройство системы глубоководных культур [4].

Figure 6. The device of DWC [4].

Устройство: Корни погружены в аэрируемый раствор. Растения закреплены в плавающей платформе (пенопласт). Воздушный насос с камнем насыщает воду кислородом (Рис. 6).

Среди плюсов данной системы можно отметить быстрый рост растений благодаря прямому доступу к кислороду и питательным веществам, а также простоту конструкции. Однако у неё есть и минусы: требуется тщательный контроль температуры воды, так как есть риск гниения корней, кроме того, метод не подходит для выращивания крупных культур, таких как томаты или тыквы. Наиболее эффективна система для зелени и клубники.

Периодическое затопление (Ebb and Flow / Flood and Drain)

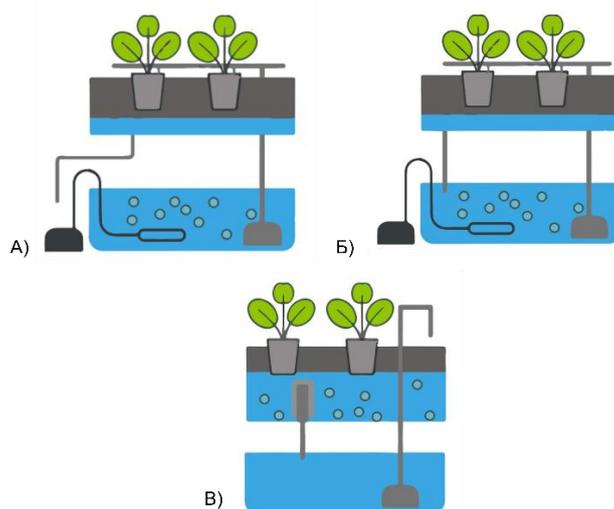


Рисунок 7. Устройство систем: А) Капельная; Б) Реверсивная капельная; В) Периодического затопления [4].

Figure 7. The device of systems: A) Drip; B) Reversible drip; C) Ebb and Flow [4].

Устройство: Субстрат (керамзит, гравий) затопляется раствором по таймеру. После затопления жидкость сливается обратно в резервуар (Рис.7).

Среди преимуществ этой системы можно отметить её универсальность — она подходит для большинства растений, а также обеспечивает хорошую аэрацию корней. Однако есть и недостатки: зависимость от электричества (из-за необходимости работы насоса) и риск засорения системы. Эффективность метода варьируется от средней до высокой в зависимости от выращиваемой культуры. Отлично растут салат и клубника, не так сильно подходит для томатов и корнеплодов.

Капельная система (Drip System)

Устройство: Насос подает раствор через капельницы к каждому растению (Рис. 7).

Бывает:

- Реверсивная – излишки раствора возвращаются в бак.
- Нереверсивная – раствор не собирается обратно (менее экономичная).

Данная система имеет ряд существенных преимуществ: она отлично подходит для выращивания крупных культур, таких как томаты и огурцы, а также легко масштабируется под разные площади посадки. Однако есть и недостатки – капельницы склонны к засорению, а система требует точного расчёта подачи воды и питательных веществ. Благодаря высокой эффективности этот метод широко применяется в промышленных теплицах.

Аэропоника (Aeroponics) – самая современная и эффективная

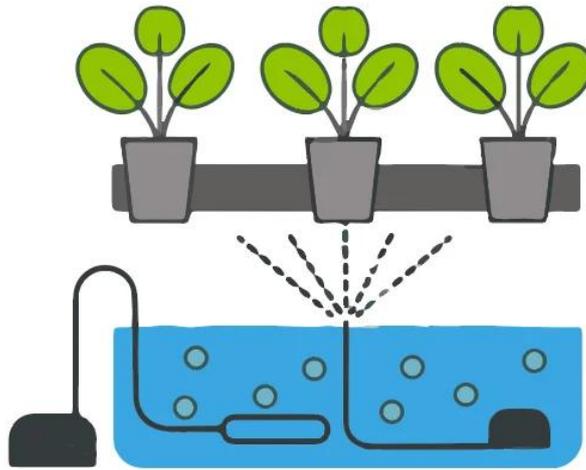


Рисунок 8. Устройство aeropоники [4]

Figure 8. The device of the aeroponics [4]

Устройство: Корни висят в воздухе и орошаются туманом из питательного раствора. Распыление происходит через ультразвуковые или форсунки высокого давления (Рис. 8).

Эта система обеспечивает максимальный доступ кислорода к корням, что даёт рекордные темпы роста растений, а также позволяет существенно экономить воду и удобрения. Однако она отличается сложной конструкцией и высокой стоимостью, а также критически зависит от бесперебойного электроснабжения. Благодаря выдающейся эффективности подобные технологии даже используются NASA для выращивания растений в космосе.

Технология нанесения питательной пленки (NFT) – популярная для зелени

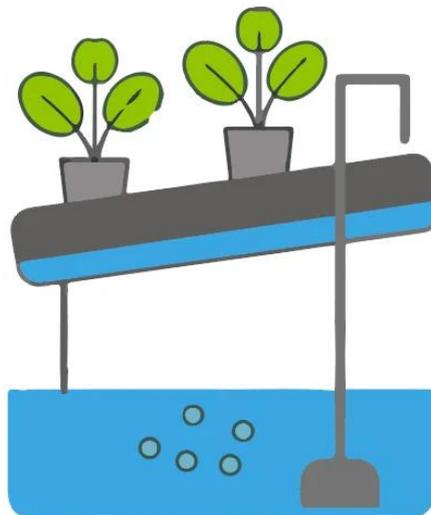


Рисунок 9. Устройство системы нанесения питательной пленки [4]

Figure 9. The device of the NFT system [4]

Устройство: Растения размещены в наклонных желобах. Тонкий слой раствора постоянно течет по дну, омывая корни (Рис. 9).

Главные преимущества этой системы — экономный расход питательного раствора и отличная аэрация корней, что ускоряет рост растений. Однако она не подходит для культур с длительным циклом выращивания (например, многолетних или крупных растений), так как их разросшиеся корни могут полностью забить каналы системы.

Комплексные преимущества и недостатки гидропонных систем

Таблица 2 – Преимущества и недостатки гидропоники

Table 2 – Advantages and disadvantages of hydroponics

Критерий	Преимущества	Недостатки
Водопотребление	Экономное и эффективное потребление	Нужна чистая вода, без солей и загрязнений
Урожайность	На 30–50% выше, чем в грунте, уменьшение потерь продукции до 5%	Высокие затраты на освещение и контроль над температурой и другими климатическими показателями
Скорость роста	Растения созревают на 20–30% быстрее	Необходим постоянный контроль параметров pH
Использование земли	Можно использовать неплодородные и городские площади. Прекращение эрозии и истощение плодородного слоя, засоления и химического загрязнения грунтов, восстановление деградированных земель за счет сокращения их сельскохозяйственной нагрузки	Требует стабильного энергоснабжения
Защита от вредителей	Минимальное использование пестицидов	Риск быстрого распространения болезней в растворе
Климатическая независимость	Круглогодичное производство в любом регионе	Высокие стартовые инвестиции на оборудование и автоматизацию
Экологичность	Снижение выбросов CO ₂ за счёт локального производства	Зависимость от искусственных удобрений
Трудозатраты	Автоматизация снижает потребность в ручном труде, создает новые рабочие места	Требуются квалифицированные специалисты

Стратегические рекомендации по внедрению гидропонных установок.

Для развитых стран:

- Акцент на крупных автоматизированных комплексах с интеграцией ИИ
- Развитие научно-исследовательских центров по оптимизации технологий.
- Создание благоприятных регуляторных условий и систем.

Для развивающихся стран:

- Разработка недорогих адаптированных систем.
- Массовое обучение фермеров через программы международной помощи.
- Создание локальных центров по производству питательных растворов.

Для особых климатических зон и других трудных условий:

- Арктических регионов
- Пустынных территорий
- Тропиков
- На космических станциях

Заключительные выводы. Гидропонные технологии представляют собой один из наиболее перспективных методов современного сельского хозяйства, способный решить множество глобальных проблем. Проведенный анализ демонстрирует, что гидропоника обладает значительными преимуществами перед традиционными методами земледелия. Гидропонные системы демонстрируют впечатляющую эффективность в использовании воды, сокращая её потребление. Это особенно актуально для регионов, страдающих от засухи и нехватки пресной воды. Благодаря оптимальному контролю питательных веществ, освещения и микроклимата, гидропонные установки обеспечивают ускоренный рост растений и повышение урожайности. Это открывает новые возможности для обеспечения продовольственной безопасности, особенно в условиях роста населения и урбанизации. Разнообразие гидропонных систем позволяет подобрать оптимальное решение для разных культур и условий выращивания.

Список использованных источников

1. Состояние продовольственной безопасности и питания в мире в 2023 году [Электронный ресурс] / Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (FAO). — 2023. — URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content> (дата обращения: 1.06.2025). — Текст: электронный.
2. Всемирный фонд дикой природы. Изучение отрасли и влияния контролируемой среды сельского хозяйства // WWF. — 2021. — URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content> (дата обращения: 31.05.2025). — Текст : электронный.
3. Организация Объединённых Наций. Прогнозы численности населения мира в 2019 году // UN. — 2019. — URL: <https://www.worldwildlife.org/publications/indoor-soilless-farming-phase-i-examining-the-industry-and-impacts-of-controlled-environment-agriculture> (дата обращения: 31.05.2025). — Текст : электронный.
4. Just Grow. Гидропонное оборудование: руководство по выбору [Электронный ресурс] // Just Grow. — 2024. — URL: <https://just-grow.ru/selection> (дата обращения: 09.06.2025). — Текст: электронный.

Reference

1. The state of food security and nutrition in the world in 2023 [Electronic resource] / Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). - 2023. — URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content> (date of request: 1.06.2025). — Text: electronic.
2. The World Wildlife Fund. Study of the industry and the impact of the controlled environment of agriculture // WWF. — 2021. — URL: [<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content>] (date of access: 31.05.2025). — Text : electronic.
3. The United Nations. Forecasts of the world population in 2019 // UN. — 2019. — URL: <https://www.worldwildlife.org/publications/indoor-soilless-farming-phase-i-examining-the-industry-and-impacts-of-controlled-environment-agriculture> (date of request: 31.05.2025). — Text : electronic.
4. Just Grow. Hydroponic Equipment Selection Guide // Just Grow. — 2024. — URL: <https://just-grow.ru/selection> (date of request: 09.06.2025). — Text: electronic.

HYDROPONIC INSTALLATIONS AND THEIR IMPACT ON AGRICULTURE

Danilova Elizaveta Vyacheslavovna

bachelor's degree student

Department of Applied Hydrometeorology

Russian State Hydrometeorological University

Saint-Petersburg

E-mail: ncat787@mail.ru

© Е. В. Данилова 2025

УДК: 631.53

Хуснутдинов И. И., Диммухаметова А. В., Хафизов А. А.

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ДУБОВЫХ КУЛЬТУР И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Хуснутдинов Ильнур Ильдусович

Аспирант 3 курса А421-01

Факультет лесного хозяйства и экологии

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

husnutdinov_ilnur@rambler.ru

Диммухаметова Аделина Васильевна

Аспирант 1 курса А441-02

Факультет лесного хозяйства и экологии

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

adelina.terenteva@mail.ru

Хафизов Айрат Альбертович

Магистр 1 курса М441-01

Факультет лесного хозяйства и экологии

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

ayratikhafizov2002@gmail.com

Аннотация. В представленной статье рассмотрены методы создания дубовых культур и их роль в формировании защитных лесных насаждений. Дано обоснование включения дубовых насаждений в состав защитных лесных полос и посадок, описаны особенности основных способов создания дубрав (включая прямой посев желудей в грунт, выращивание посадочного материала в питомниках, а также сопутствующие агротехнические мероприятия). Приведены данные исследований относительно состояния дубовых культур и эффективности различных методов их выращивания. Особое внимание уделено сохранению генетического разнообразия дуба и его адаптационному потенциалу в условиях изменения климата. Отмечена значимость дубовых культур для повышения устойчивости и биоразнообразия защитных лесных экосистем.

Ключевые слова: дубовые культуры; посев желудей; питомники; агротехника; защитные лесные насаждения; биоразнообразие; адаптация.

METHODS OF CREATING OAK STANDS AND THEIR ROLE IN THE FORMATION OF PROTECTIVE FOREST PLANTATIONS

Abstract. This article examines the methods of establishing oak stands and their role in the formation of protective forest plantations. It provides a rationale for incorporating oak stands into protective forest belts and plantings, outlines the features of the main methods for creating oak forests (including direct sowing of acorns, cultivation of planting stock in nurseries, as well as associated agrotechnical practices), and discusses research findings on the condition of oak stands and the effectiveness of different cultivation approaches. Special attention is paid to preserving the genetic diversity of oak and its adaptive potential under changing climate conditions. The results highlight the significance of oak stands for enhancing the stability and biodiversity of protective forest ecosystems.

Key words: oak stands; acorn sowing; tree nursery; silvicultural practices; protective forest plantations; biodiversity; adaptation.

Введение. Лес является не только источником кислорода и древесного сырья, но и важнейшим элементом природного богатства. Его роль в ландшафте многогранна: лесные массивы обеспечивают защиту почв от эрозии, служат местом отдыха, смягчают климат и регулируют водный баланс территории. Развитие эффективного лесного хозяйства выступает ключевым фактором экономического процветания, особенно для аграрных регионов с дефицитом лесных ресурсов.

Одной из приоритетных задач современного лесного хозяйства является увеличение лесопокрываемости и объемов лесной продукции при оптимальном использовании земельных ресурсов. Это актуально как с экономической точки зрения (удовлетворение потребности народного хозяйства в древесине), так и с экологической – для обеспечения устойчивости ландшафтов. В регионах с недостаточной лесистостью, таких как Республика Татарстан (лесами покрыто всего 17,4% территории), наращивание площади лесных насаждений приобрело особое значение. В Татарстане поставлена задача создания новых лесных насаждений на землях, ранее не использовавшихся в сельском хозяйстве, с целью повышения общей продуктивности лесного фонда [1]. Выполнение этой задачи возможно лишь при эффективном лесоразведении и развитии лесных культур, среди которых дубовые культуры занимают важное место.

В настоящее время создание лесных культур путем прямого посева желудей становится неотъемлемой составляющей лесовосстановления. Этот метод приобретает особую актуальность в условиях изменяющегося климата и угрозы утраты биоразнообразия. Дуб черешчатый (*Quercus robur*), как один из ключевых лесообразующих видов, играет важную роль в поддержании экологического равновесия и имеет большое значение для множества сфер – от сохранения почв и гидрологического режима до рекреации [2]. Дубовые насаждения отличаются долголетием и устойчивостью, поэтому их активно рассматривают в качестве основы для защитных лесных насаждений – специальных лесных полос и массивов, создаваемых для охраны полей, рек, населенных пунктов и иных объектов от негативных природных факторов. Защитные лесные насаждения призваны снижать скорость ветра, предотвращать водную и ветровую эрозию почв, регулировать сток талых и дождевых вод, а также улучшать микроклимат на прилегающих территориях. Включение дуба в состав таких защитных насаждений обосновано его биологическими особенностями: глубокая корневая система дуба укрепляет грунты склонов, мощная крона создает надежный барьер от ветра, а толстая кора обеспечивает сравнительно высокую огнестойкость. Кроме того, дубравы формируют сложные биогеоценозы с высоким уровнем биоразнообразия, что повышает общую устойчивость защитных лесных полос.

Несмотря на очевидные преимущества дубовых культур, процесс их создания и успешного выращивания является длительной и многогранной задачей. Необходимо учитывать ряд факторов – от качества посадочного материала до технологий посадки и ухода – чтобы обеспечить приживаемость и рост дуба на целевых территориях. Рассмотрим основные методы создания дубовых культур и те агротехнические приемы, которые позволяют добиться наилучших результатов. Также проанализируем роль создаваемых дубрав в экосистемах защитных лесонасаждений и обобщим результаты исследований, посвященных состоянию таких культур.

Методы создания дубовых культур. Для успешного формирования дубовых насаждений применяется несколько подходов. Каждый из них имеет свои особенности, преимущества и ограничения:

Для успешного формирования дубовых насаждений применяется несколько подходов, каждый из которых обладает своими особенностями, преимуществами и ограничениями.

Один из наиболее распространённых методов — прямой посев желудей в грунт. Этот способ предполагает высевание желудей непосредственно на подготовленных лесокультурных участках. Процесс включает сбор и отбор качественного семенного материала, его хранение, стратификацию и

последующую посадку с организацией ухода за всходами. Прямой посев обеспечивает максимальное сохранение генетического разнообразия дуба, поскольку на участок высевается большое количество семян от разных деревьев, что повышает устойчивость будущих насаждений к болезням, вредителям и изменяющимся условиям среды [3]. При таком способе дуб формирует стержневую корневую систему без деформаций, что улучшает его устойчивость к засухе и ветру. Посев желудей может быть эффективно использован для облесения труднодоступных участков и склонов, где механизированные способы ограничены. Например, данный метод был успешно применён для облесения крутых склонов без вмешательства в рельеф местности [10].

Однако, эффективность прямого посева требует соблюдения ряда агротехнических мероприятий. Необходима качественная подготовка почвы: очистка участка от травянистой растительности, иногда понижение либо удаление пней на вырубках [3]. Кроме того, требуется защита желудей от птиц и грызунов, а также регулирование влажности почвы. Всходы на ранних стадиях уязвимы к конкуренции со стороны сорной растительности, что делает регулярный уход (прополка, рыхление) обязательным.

Другим широко применяемым способом является выращивание сеянцев в питомнике с последующей посадкой на постоянное место. В этом случае желуди высеваются в питомнике, где обеспечиваются благоприятные условия для их прорастания и роста: рыхлая плодородная почва, систематический полив, прополка и притенение. Через 1...2 года окрепшие сеянцы пересаживаются на лесокультурный участок. Преимуществом метода является высокая приживаемость саженцев за счёт развитой корневой системы, а также возможность отбраковки слабых растений и проведения закаливания. Применение стимуляторов роста, микроудобрений и средств защиты в питомнике позволяет улучшить морфометрические показатели сеянцев и повысить их устойчивость к стрессам при пересадке [4].

К недостаткам метода относится высокая трудоёмкость и необходимость в материально-технической базе: оборудование питомника, уход за растениями, затраты на выкопку и транспортировку. Также возможна деформация корневой системы при пересадке, что в будущем снижает устойчивость деревьев. Несмотря на это, метод остаётся незаменимым при создании лесополос и озеленительных насаждений вдоль дорог и полей, где требуется быстрое формирование защитного эффекта.

Независимо от выбранного способа — посева или посадки, — успешность формирования дубрав во многом зависит от качества агротехнического сопровождения. На этапе подготовки участка важно полностью удалить сорную растительность и кустарники, выровнять микрорельеф, а на вырубках провести корчевание или понижение пней [3]. После высадки или посева требуется систематический уход: борьба с сорной растительностью (механическая или с использованием разрешённых гербицидов), полив в засушливые периоды, внесение удобрений. Эффективными мерами также являются окучивание, рыхление почвы вокруг саженцев, аэрация приствольных зон.

Особое внимание необходимо уделить защите дубовых культур от вредителей и болезней. Молодые растения повреждаются майским хрущом, листогрызущими насекомыми; желуди страдают от грибных инфекций. С учётом изменений климата отмечается рост заражённости желудей патогенными грибами, что требует протравливания семян и фитосанитарного контроля всходов [9]. Также возможны повреждения со стороны диких животных, что делает актуальными меры физической защиты (ограждение, репелленты). Постоянный мониторинг состояния культур необходим для своевременного выявления выпавших растений, корректировки режима ухода и оценки эффективности применяемых технологий.

Результаты и обсуждение. Дубовые насаждения, введённые в состав защитных лесных полос и посадок, значительно повышают их экологическую и функциональную эффективность. Мощная

корневая система дуба способствует надёжной фиксации почвы, предотвращая развитие водной и ветровой эрозии, особенно на склонах и в прибрежных зонах. Развитая широкая крона взрослого дерева создаёт устойчивый полог, эффективно снижающий силу ветра, тем самым обеспечивая защиту сельскохозяйственных угодий от суховеев и выдувания плодородного слоя. Благодаря позднему распусканию листьев весной, под пологом дуба развивается травянистый ярус, формирующий плотную дернину и дополнительно стабилизирующий почву. В отличие от берёзы и тополя, характеризующихся короткой продолжительностью жизни, дубовые насаждения отличаются долголетием, что снижает затраты на реконструкцию и обновление защитных полос. Такие насаждения формируют устойчивый и долговечный элемент лесозащитной инфраструктуры.

Полевые обследования защитных лесонасаждений в зоне Предкамья Республики Татарстан подтвердили, что для повышения устойчивости и долговечности насаждений необходим грамотный подбор породного состава. Наличие в составе полос биологически устойчивых видов, в том числе дуба, обеспечивает их стабильное функционирование и снижает чувствительность к неблагоприятным воздействиям [5]. Кроме основной противозерозионной функции, дубравы обладают санитарно-гигиеническим эффектом. Дуб выделяет летучие фитонциды, обладающие антимикробными свойствами, благодаря чему снижается обсеменённость воздуха патогенными микроорганизмами, что особенно важно вблизи агроэкосистем и населённых пунктов.

Практика лесовосстановления и результаты научных исследований показывают, что успех создания дубовых культур во многом определяется качеством исходного материала и строгостью соблюдения технологических регламентов. В случае прямого посева желудей ключевым фактором выступает их кондиционность, а также защита всходов на ранних стадиях роста. Низкое качество или фитопатологическое поражение семян, ставшее особенно актуальным в условиях потепления климата, может значительно снизить полевую всхожесть. Установлено, что уровень поражённости желудей патогенами (плесень, гниль) за последние годы увеличился, что требует обязательного протравливания и сортировки перед посевом [9]. Однако при правильной агротехнике и благоприятных почвенно-климатических условиях уровень выхода жизнеспособных семян может достигать 50...70% от общего количества высеянных желудей, что оценивается как высокая эффективность метода.

Альтернативой прямому посеву выступает посадка сеянцев, выращенных в питомнике. Наилучшие результаты приживаемости демонстрируют дубки с закрытой корневой системой – более 90%, благодаря отсутствию травматизации корней. Для сеянцев с открытой корневой системой этот показатель колеблется в пределах 70...85% при условии соблюдения всех агротехнических требований (влажная посадочная яма, расправление корней, уплотнение почвы). Применение биостимуляторов, микроудобрений и средств защиты в питомниках позволяет получить более мощные саженцы, обладающие повышенной устойчивостью к стрессам. Отмечено, что такие растения на третьем году после высадки превосходят контрольные по приросту ствола и кроны на 15...20% [4], что свидетельствует о высокой эффективности интегрированных биотехнологий в питомниковом производстве.

Успешность формирования дубрав в значительной степени зависит от соответствия пород — в том числе дуба черешчатого — агроэкологическим условиям места посадки. Проведённые исследования показывают, что дубовые культуры в юго-восточной части Татарстана, характеризующейся более засушливым климатом и менее плодородными почвами, развиваются медленнее, требуют дополнительных мероприятий по уходу, включая полив и рыхление. В то же время на севере региона, где климат более мягкий, а почвы богаче, дубы демонстрируют лучшие показатели роста и сохранности [8]. Это подчёркивает важность подбора адаптированных местных популяций, устойчивых к конкретным условиям произрастания. Кроме того, генетическое

разнообразие дубовых культур — ключевой фактор их приспособляемости. Посев желудей, собранных от разных материнских деревьев, повышает гетерогенность посадок и способствует формированию более устойчивых к внешним воздействиям сообществ.

Для повышения биологической устойчивости дубрав рекомендуется сохранять в составе насаждений примесь других древесных пород (например, липы, клёна, берёзы), что способствует стабилизации микроклимата, улучшению почвенных свойств и созданию более сбалансированного биоценоза [7]. Такой комплексный подход к проектированию породного состава и адаптации методов выращивания позволяет эффективно решать задачи защитного лесоразведения.

Сформированные дубовые культуры оказывают положительное влияние на биоразнообразие. Под их пологом развивается богатая фауна: насекомые, птицы, мелкие млекопитающие, трофически связанные с дубом. Старые дуплистые деревья обеспечивают места гнездования и укрытия, тем самым создавая условия для устойчивого функционирования экосистем. Кроме того, дубравы улучшают качество среды: снижают пылевую нагрузку, повышают содержание гумуса в почве за счёт листового опада. Такие экосистемные функции выходят далеко за рамки лесохозяйственной ценности и делают дубравы важным элементом агроландшафтов, обеспечивающим экологическую устойчивость окружающей среды [2].

Современный этап развития лесного хозяйства требует не только воспроизводства дубовых культур, но и совершенствования технологий их выращивания и защиты. Перспективными направлениями являются селекция устойчивых к засухе и болезням форм дуба, совершенствование методик проращивания желудей, микоризация семян, а также внедрение цифрового мониторинга состояния культур. Продолжаются исследования, направленные на внедрение биологических средств защиты, включая использование энтомофагов и антагонистических грибов. Постоянный контроль за состоянием насаждений в условиях изменения климата позволит вовремя диагностировать негативные изменения (усыхание, вспышки вредителей) и корректировать практики управления. Прогнозирование устойчивости дуба к климатическим и антропогенным стрессам требует углублённых исследований, включающих эколого-физиологические и генетические аспекты [8].

Выводы. 1. Дубовые культуры являются ключевым элементом защитных лесных насаждений, обеспечивая долговременную защиту почв и сельскохозяйственных угодий от эрозии, смягчение климата и поддержку биоразнообразия на ландшафтном уровне. Включение дуба в лесополосы повышает их эффективность и устойчивость.

2. Основными методами создания дубрав выступают прямой посев желудей и посадка выращенных в питомнике семян. Прямой посев позволяет сохранить генетическое разнообразие и сформировать устойчивую корневую систему, тогда как использование саженцев обеспечивает высокий первоначальный процент приживаемости. Выбор метода зависит от условий участка и поставленных целей, а успешность каждого из них определяется качеством посадочного материала и соблюдением агротехники.

3. Комплекс агротехнических мер – подготовка почвы, уход (прополка, полив, подкормка), защита от вредителей – является обязательным условием при выращивании дубовых культур. Без должного ухода выживаемость и рост дуба заметно снижаются, особенно в первые годы после посадки.

4. Дубовые насаждения способствуют сохранению и повышению биоразнообразия. Они создают благоприятную среду обитания для множества видов флоры и фауны. Здоровые дубравы служат своего рода опорным каркасом экосистем, обеспечивая их стабильность и способность адаптироваться к внешним изменениям.

5. Необходимо продолжать исследования и мониторинг дубовых культур, особенно в контексте изменения климата. Научно обоснованная информация о влиянии климатических и антропогенных факторов на рост, здоровье и регенерацию дуба позволит корректировать стратегии

лесоразведения. Внедрение новых технологий (генетический анализ посадочного материала, биопрепараты, цифровой мониторинг состояния насаждений) будет способствовать повышению эффективности создаваемых дубовых культур и укреплению их роли в защитных лесных насаждениях.

Список использованных источников

1. Петрова, Г. А. Воспроизводство дубрав в республике Татарстан: проблема и пути ее решения / Г. А. Петрова, И. Р. Тазиев // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса : научные труды Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Мартыянова А.П., Казань, 27–28 октября 2022 года / Казанский государственный аграрный университет. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2022. – С. 773-776.
2. Лесная наука в Казани / Х. Г. Мусин, А. Р. Мухаметшина, Р. Х. Гафиятов, Р. Р. Сабирова // Актуальные проблемы развития лесного комплекса : Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Вологда, 01 декабря 2020 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2020. – С. 150-152.
3. Ятманова, Н. М. Оценка эффективности понижения пней при создании лесных культур в условиях Зеленодольского лесничества РТ / Н. М. Ятманова, А. Р. Мустафина, А. Ш. Хасанова // Актуальные проблемы развития лесного комплекса : Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Вологда, 01 декабря 2020 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2020.
4. Сравнительный анализ эффективности применения различных препаратов при выращивании сеянцев дуба черешчатого в условиях Республики Татарстан / И. Р. Тазиев, Н. М. Тазмеев, Х. Г. Мусин [и др.] // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2023. – № 2. – С. 45-56.
5. Оценка состояния защитных лесных насаждений в Предкамье РТ / Р. Р. Сибгатуллина, А. Р. Мухаметшина, Н. И. Мирсияпов, А. Р. Валиев // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса : Научные труды Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора П.Г. Мудрова, Казань, 26–27 октября 2023 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2023. – С. 335-340.
6. Глушко, С. Г. Лесные экосистемы и оценка их состояния / С. Г. Глушко, И. Р. Галиуллин, Ш. Ш. Шайхразиев. – Казань : Казанский государственный аграрный университет, 2022. – 100 с. – ISBN 978-5-98946-362-6.
7. Мухаметшина, А. Р. Оценка состояния защитных насаждений на овражно-балочных землях / А. Р. Мухаметшина, Х. Г. Мусин // Циркулярная экономика в сельском хозяйстве: международный опыт для Республики Татарстан : Сборник трудов по материалам круглого стола в рамках итоговой коллегии Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Татарстан, Казань, 24–25 февраля 2022 года. – Казань, Казанский ГАУ: Казанский государственный аграрный университет, 2022. – С. 191-197.
8. Тазиев, И. Р. Современное состояние дубрав в различных агроклиматических условиях Республики Татарстан / И. Р. Тазиев, Р. Р. Сабирова, И. М. Хакимуллин // Студенческая наука - аграрному производству : Материалы 80-ой студенческой (региональной) научной конференции, Казань, 08–09 февраля 2022 года. Том 3. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2022. – С. 127-133.
9. Тазиев, И. Р. Фитопатологический анализ желудей дуба черешчатого в условиях изменения климата Республики Татарстан / И. Р. Тазиев // Студенческая наука - аграрному производству : Материалы 78-ой студенческой (региональной) научной конференции, Казань, 27 февраля 2020 года. Том 3. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2020. – С. 85-88.

10. Облесение крутых склонов посевом желудей дуба черешчатого без нарушения существующего ландшафта / А. Р. Мухаметшина, Х. Г. Мусин, Р. Р. Сабирова, И. Р. Тазиев // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса : научные труды Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Мартьянова А.П., Казань, 27–28 октября 2022 года / Казанский государственный аграрный университет. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2022. – С. 757-761.

Reference

1. Petrova, G. A. Reproduction of oak groves in the Republic of Tatarstan: the problem and the ways of its solution / G. A. Petrova, I. R. Taziyev // Current state and prospects for the development of the technical base of the agro-industrial complex: scientific works of the All-Russian (national) scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor A.P. Martyanov, Kazan, October 27-28, 2022 / Kazan State Agrarian University. - Kazan: Kazan State Agrarian University, 2022. - P. 773-776.
2. Forest science in Kazan / Kh. G. Musin, A. R. Mukhametshina, R. Kh. Gafiyatov, R. R. Sabirova // Actual problems of the development of the forest complex: Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference, Vologda, December 01, 2020. – Vologda: Vologda State University, 2020. – P. 150-152.
3. Yatmanova, N. M. Evaluation of the effectiveness of stump reduction when creating forest crops in the Zelenodolsk forestry of the Republic of Tatarstan / N. M. Yatmanova, A. R. Mustafina, A. Sh. Khasanova // Actual problems of forest complex development: Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference, Vologda, December 01, 2020. – Vologda: Vologda State University, 2020.
4. Comparative analysis of the effectiveness of using various preparations when growing pedunculate oak seedlings in the Republic of Tatarstan / I. R. Taziyev, N. M. Tazmeyev, Kh. G. Musin [et al.] // Transactions of the St. Petersburg Research Institute of Forestry. – 2023. – No. 2. – P. 45-56.
5. Assessment of the condition of protective forest plantations in the Kama region of the Republic of Tatarstan / R. R. Sibgatullina, A. R. Mukhametshina, N. I. Mirsiyapov, A. R. Valiev // Current state and prospects for the development of the technical base of the agro-industrial complex: Scientific works of the All-Russian (national) scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor P. G. Mudrov, Kazan, October 26-27, 2023. – Kazan: Kazan State Agrarian University, 2023. – P. 335-340.
6. Glushko, S. G. Forest ecosystems and assessment of their condition / S. G. Glushko, I. R. Galiullin, Sh. Sh. Shaikhraziev. – Kazan: Kazan State Agrarian University, 2022. – 100 p. – ISBN 978-5-98946-362-6.
7. Mukhametshina, A. R. Assessment of the state of protective plantings on ravine-gully lands / A. R. Mukhametshina, H. G. Musin // Circular economy in agriculture: international experience for the Republic of Tatarstan: Collection of papers based on the materials of the round table within the framework of the final board of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Tatarstan, Kazan, February 24–25, 2022. – Kazan, Kazan State Agrarian University: Kazan State Agrarian University, 2022. – P. 191–197.
8. Taziyev, I. R. Current state of oak groves in various agroclimatic conditions of the Republic of Tatarstan / I. R. Taziyev, R. R. Sabirova, I. M. Khakimullin // Student science - for agricultural production: Proceedings of the 80th student (regional) scientific conference, Kazan, February 8–9, 2022. Vol. 3. - Kazan: Kazan State Agrarian University, 2022. - Pp. 127-133.
9. Taziyev, I. R. Phytopathological analysis of common oak acorns under changing climate conditions of the Republic of Tatarstan / I. R. Taziyev // Student science - for agricultural production: Proceedings of the 78th student (regional) scientific conference, Kazan, February 27, 2020. Volume 3. – Kazan: Kazan State Agrarian University, 2020. – Pp. 85-88.

10. Afforestation of steep slopes by sowing acorns of common oak without disturbing the existing landscape / A. R. Mukhametshina, H. G. Musin, R. R. Sabirova, I. R. Taziyev // Current state and prospects for the development of the technical base of the agro-industrial complex: scientific works of the All-Russian (national) scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor A.P. Martyanov, Kazan, October 27-28, 2022 / Kazan State Agrarian University. – Kazan: Kazan State Agrarian University, 2022. – Pp. 757-761.

METHODS OF CREATING OAK STANDS AND THEIR ROLE IN THE FORMATION OF PROTECTIVE FOREST PLANTATIONS

Husnutdinov Ilnur Ildusovich

3rd-year postgraduate student, A421-01
Forestry and Ecology Faculty
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia
husnutdinov_ilnur@rambler.ru

Dimmukhametova Adelina Vasilyevna

1st-year postgraduate student, A441-02
Forestry and Ecology Faculty
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia
adelina.terenteva@mail.ru

Khafizov Ayrat Albertovich

1st-year Master's student, M441-01
Forestry and Ecology Faculty
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia
ayratikhafizov2002@gmail.com

© Хуснутдинов И.И., Диммухаметова А.В., Хафизов А.А. 2025

УДК 556.3:631.84

Кузнецов Е.В.¹, Демин И. Ю.,² Леонов Е.Л.,³ Сазанов В.К.⁴, Вагизов М. Р.^{1,5}

**К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ УСЛОВИЙ ОПТИМИЗАЦИИ
ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНОЙ СЕТИ ПУТЁМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА МАЛЫХ РЕК С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ
ЛЕСОМЕЛИОРАЦИИ И ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Кузнецов Евгений Николаевич¹

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
заведующий кафедры лесоводства

Институт леса и природопользования

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова

E-mail: evg_kuznetsov@mail.ru

Леонов Евгений Леонидович²

Инженер геофизик

Генеральный директор АНО РППТ «Уникальные ландшафты»

E-mail: leonovell@mail.ru

Демин Илья Игоревич³

Генеральный директор

ООО «Фито Смарт»

E-mail: pm@agrostab.ru

Сазанов Виталий Николаевич⁴

биотехнолог биологических очистных сооружений,

Научный руководитель АНО РППТ «Уникальные ландшафты»

E-mail: sazavit@yandex.ru

Вагизов Марсель Равильевич^{1,5}

Доктор технических наук, доцент

Заведующий кафедрой Информационных систем и технологий

¹ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова

Профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности

² ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет

Санкт-Петербург

E-mail: bars-tatarin@yandex.ru

Аннотация. Данная статья создана с целью консолидации сил для противодействия опустыниванию территорий и истощению водных объектов Российской Федерации и Евразии в целом. В статье рассматривается проблема изменения полноводности гидрологического режима речной сети под воздействием антропогенных факторов и глобальных климатических изменений. Отмечается, что потепление климата приводит к увеличению неравномерности выпадения осадков и изменению соотношения элементов водного баланса, что в совокупности с опустыниванием территорий и выплескиванием ливневых стоков с сельскохозяйственных угодий и селитебных территорий усугубляет ситуацию. Особое внимание уделяется разрушению лесного покрова, которое лишает экосистему водосбора речной сети её средообразующих функций, таких

как защита от испарения атмосферных осадков и грунтовых вод, диффузного загрязнения и обеспечения подпитки рек в засушливый период.

Ключевые слова: гидрологический режим речной сети, экология речных экосистем, лесной каркас, восстановление полноводности рек, геоинформационное моделирование, цифровые двойники.

ON THE QUESTION OF THE NEED TO CREATE CONDITIONS FOR OPTIMIZING THE WATER BALANCE OF THE RIVER NETWORK BY RESTORING THE HYDROLOGICAL REGIME OF SMALL RIVERS USING FOREST RECLAMATION TECHNOLOGIES AND GEOINFORMATION MODELING

Abstract. This article aims to consolidate efforts to combat desertification and restore water bodies in the Russian Federation and Eurasia as a whole. This article aims to consolidate efforts to combat desertification and restore water bodies in the Russian Federation and Eurasia as a whole. It examines the changing hydrological regime of river networks under the influence of anthropogenic factors and global climate change. It notes that global warming leads to increased precipitation variability and changes in the balance of water balance elements, which, combined with desertification and runoff pollution from agricultural lands and urban areas, exacerbates the situation. Particular attention is paid to the destruction of forest cover, which deprives the river network of its habitat-forming functions, such as protection from evaporation, diffuse pollution, and provision of river recharge during dry periods.

Keywords: hydrological regime, river ecosystem ecology, forest framework, river restoration, geoinformation modeling, digital twins.

Введение. Речная сеть в период климатических перемен. Антропогенное воздействие и глобальные изменения климата приводят к изменениям гидрологического режима речной сети.

Происходящее потепление климата увеличивает неравномерность поступления атмосферных осадков и приводит к изменению сложившихся ранее соотношений и роли различных элементов водного баланса в формировании гидрологического режима рек.

К процессам естественного изменения формирования водного потока добавляются антропогенные факторы - опустынивание территорий и выплескивание вод через ливневые каналы с сельскохозяйственных угодий, селитебных территорий и дорожно-транспортной сети.

Разрушение лесного покрова естественных экосистем водосбора речной сети лишает её способности выполнять основные средообразующие функции - защиту от испарения осадков и диффузного загрязнения, перевод поверхностного стока в грунт, подпитку рек на пике летней жары. Это ещё больше усугубляет неравномерность гидрологического режима речного потока и приводит к всё более частым катастрофическим наводнениям и деградации водных объектов, вплоть до их исчезновения. В период климатических перемен особенно важно сохранение водных объектов от процессов их деградации.

Геоэкология речной сети. Ряд специалистов обозначают геоэкологию как комплексное междисциплинарное направление [1,2]. В нашем проекте будет использовано следующее определение данного направления. Геоэкология — междисциплинарное научное направление, объединяющее исследования состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей геосфер Земли как среды обитания человека и других организмов.

Важнейшим аспектом в формировании этих условий является водный баланс атмосферы, гидросферы и литосферы.

С точки зрения геоэкологии, территория континентов состоит из зон аккумуляции водных ресурсов и их транзита. В естественных условиях вне влияния антропогенного воздействия эти зоны функционируют не равнозначно и зависят от рельефа, характера почвы и растительности, геологических, гидрогеологических, а также от мерзлотных условий.

Речная сеть выполняет жизненно важную функцию развития континентальных экосистем подобно кровеносной системы организма. В формировании её водного баланса участвуют процессы взаимодействия и атмосферы, и гидросферы, и литосферы.

У больших речных артерий источниками пополнения водными ресурсами являются притоки их водосбора, из которых малые реки самые многочисленные.

Водный баланс речной сети. Основные процессы формирования водного баланса территории водосбора малых рек в естественных условиях состоят из поступления атмосферных осадков, которые расходуются на:

- испарение с почвы, особенно на открытых участках, где оно значительно ускоряется из-за выветривания;
- транспирацию влаги растениями;
- инфильтрацию в почво-грунты и подземные воды;
- стекание поверхностным путем в водные объекты во время весеннего половодья, дождевых паводков и локальных катастрофических ливней, преимущественно из быстро развивающейся микро-ручейковой сети, угрожающей диффузным загрязнением рек и наводнениями.

В низкую водность реки питаются из подземных источников, а также благодаря процессу атмосферной ирригации в лесных массивах водосбора (конденсации влаги воздуха в почве и густом подлеске из-за перепада температур воздуха и грунта).

Роль леса в формировании водного режима рек. Исходя из методических рекомендаций «Рекомендации по восстановлению гидрологического режима малых рек» [7], в котором описано влияние леса на окружающую среду и его использование в защитных и водоохранных целях, лес выполняет следующие функции в формировании гидрологического режима экосистемы речной сети:

Водоаккумулирующие – пополняющие реки летом и сохраняющие или увеличивающие их годовой сток вследствие усиленного снегонакопления, защиты снежного покрова от выветривания, замедления испарения почвенной влаги, перевода поверхностного стока в подземный.

Водорегулирующие - уменьшающие неравномерности поступления воды в реки из-за затянутого снеготаяния и замедленного поверхностного стока в лесу, перевода его в почву и грунт. Равномерность стока, ослабление паводков и наводнений, сказывается на чистоте воды, рыбном хозяйстве, судоходстве, энергетике.

Почвозащитные - предохраняющие почвы от размыва и смыва (водной эрозии), обвалов, от переноса ветром (ветровой эрозии), улучшающие её водно-физические свойства благодаря способности леса переводить поверхностный сток во внутрпочвенный, уменьшать степень промерзания почвы, скреплять ее корнями.

Водоочистительные - лесной массив уменьшает концентрацию биогенных элементов, вымываемых из удобрений, очищает воду от загрязнителей, разбавляет ее маломинерализованной снеговой водой из леса.

Берегозащитные - на склонах коренного берега и у бровки лес предотвращает оползни и осыпи, скрепляя почву корнями, предохраняет ее от эрозии.

Аккумулирующие, водорегулирующие, почвозащитные и водоочистительные функции проявляются вместе. Лес выполняет их на всей его площади, однако степень проявления этих функций зависит от характера гидрографической сети и расположения на ней лесных массивов, от близости лесного покрова к водотокам, рельефа, почвы, характера насаждений и от других причин.

Лесной каркас естественной экосистемы речной сети. По условиям перемещения стока в русло реки на её водосборе выделяют гидрологические зоны на которых формируются следующие средообразующие функции:

- питание грунтовых и подземных вод (водоразделы и приводораздельные склоны крутизной до 3 град.);
- формирование поверхностного стока (присетевые склоны крутизной 3-10 град.);
- питание истоков рек (верховья рек и их притоков, а также ручьи, ключи и родники);
- транзит поверхностного стока и питания подрусовых вод (ложбины, лощины и балки);
- разгрузка грунтовых и подземных вод (долины и поймы рек).

Зонами питания истоков малых рек являются многочисленные водоразделы на территории всего водосбора. Здесь аккумулируются осадки, пополняющие грунтовые и подземные воды, питающие их истоки. В естественных условиях испарение осадков в этих зонах минимально благодаря ветрозащитным свойствам лесного покрова.

Защитная зона вдоль русел рек укрепляет берега от разрушения и за счёт густого подлеска леса переводит поверхностный сток в грунт, обеспечивая защиту от диффузного загрязнения речного потока и сглаживание неравномерности его гидрологического режима.

Необходимая ширина береговой защитной зоны леса для сглаживания явлений наводнения определяется, прежде всего, скоростью фильтрации грунтовых вод в существующем типе грунта к границе поймы реки или грани русла водотока. Считается, что для этого достаточно задержка ливневых потоков на 10 – 15 дней. Таким образом, в самом водопроницаемом песчаном грунте достаточно ширина водозащитной зоны 100 -150м от грани поймы или береговой линии реки.

Лесные массивы зоны питания истоков рек и береговой защитной зоны также, как и другие лесные массивы водосбора в засушливое время благодаря процессу атмосферной ирригации подпитывают реки.

Зоны питания истоков рек и защитные зоны вдоль их русел являются наиболее важными для формирования водного баланса.

Следовательно, можно выделить зоны территории водосбора, где в естественных условиях наличие леса обеспечивает наиболее значимые функции, формирующие гидрологический режим рек. Эти зоны образуют лесной каркас речной сети.

Таким образом “лесной каркас” можно определить, как зоны естественной экосистемы водосбора, обеспечивающие необходимый гидрологический режим речной сети.

Предложенный в статье понятие «лесной каркас» не является на данный момент устоявшимся научным определением, но он отражает суть вопроса.

Правовой статус лесного каркаса. В настоящее время средообразующая роль леса становится важнее сырьевой.

В естественной экосистеме водосбора лесной каркас обеспечивает оптимальный водный баланс. При разрушении каркаса возникающие проблемы могут быть решены путём восстановления его функций с помощью лесомелиоративных технологий.

Наиболее эффективны насаждения, создаваемые в местах первичной концентрации поверхностного стока (водоразделах, приводораздельных и присетевых склонах, водоподводящих ложбинах, берегах овражно-балочной сети и у истоков рек).

Функционально все эти зоны не зависят от протяжённости реки, как прописано в определении Водоохранных зон водных объектов в Водном кодексе, а функции гармонизирующие гидрологический режим речной сети в нём вообще не обозначены. Для реализации этих функций вполне достаточно 100-150м, что соответствует ширине водоохранных зон, если скорректировать её границу от грани поймы.

Но сегодня водоохранные зоны Водного кодекса являются просто буферной зоной и служат только для наложения штрафов за нарушение предписанных ограничений.

Требуется внести в законодательство защиту самих механизмов естественной экосистемы, влияющих на оптимизацию водного баланса рек. Для восстановления средообразующих функций, гармонизирующих гидрологический режим речной сети, необходимо им дать юридическое определение, а зонам, особо значимым в формировании водного баланса, придать статус особо ценных природных территорий и закрепить за ними выполнение этих функций, как обременение землепользования.

Для владельцев участков где реализуются эти обременения необходимо обеспечить их заинтересованность в выполнении этих функций (включить механизм эко услуг). К примеру, путем предоставления льгот на аренду или другие поощрения за их выполнение.

Поскольку определение границ значимых территорий и необходимых восстановительных работ может быть очень индивидуальным для каждого участка лесного каркаса то необходимы поэтапные шаги по реализации этого процесса, а именно:

- первым этапом зафиксировать в законодательстве сами определения средообразующих функций лесного каркаса;
- далее разработать механизм определения границ и их юридической фиксации для присвоения территориям лесного каркаса особого статуса;
- и постепенно вводить особый статус на конкретных участках лесного каркаса по мере поступления запросов от местной, региональной или федеральной властей на основании проработки стратегии восстановления средообразующих функций на их территории.

Особые условия и технологии реализации проектов лесомелиорации речной сети.

Технологии лесомелиорации применяются с конца позапрошлого века, которые отражены в фундаментальной работе Василия Васильевича Докучаева [3]. По этим технологиям производят различные типы лесопосадок и др. сооружений, благодаря которым восстанавливают средообразующие функции естественной экосистемы[4]. Вполне логичным видится применение современных технологий дистанционного зондирования и геоинформационного моделирования в вопросе мониторинга и анализа процессов восстановления гидрологического режима рек, что зарекомендовало себя в близких по тематике проектах [5,6].

Технологии лесомелиорации для улучшения климатических условий используются в сельском хозяйстве, продемонстрированы результатами реализации первого этапа «Сталинского плана преобразования природы», благодаря которому удалось добиться отличных результатов: рост урожайности зерна составил более чем 25 %, урожайность овощей в некоторых местах повысилась на 75 %, а трав – на 200 %! Это позволило улучшить состояние колхозов и благосостояние жителей сел и деревень.

Для реализации проектов лесомелиорации на нарушенных участках лесного каркаса по формированию водного баланса в масштабах территорий водосбора водных объектов необходимы долгосрочное прогнозирование результатов и методические инструменты на основе IT технологий:

- цифровой двойник речной сети для автоматизации процедуры определения границ лесного каркаса естественной экосистемы проблемной территории и определения средообразующих функций, которые необходимо восстановить на нарушенных участках;

- симулятор природных процессов для прогнозирования изменений микроклиматических условий в процессе развития проектов лесомелиорации через 5, 10 и более лет;
- создание интерактивной 3Д модели экосистем для визуализации процессов изменений микроклиматических условий.

Для решения задачи оптимизации водного баланса речной сети, предлагается:

1. Зафиксировать в законодательстве определения средообразующих функций естественной экосистемы и механизм определения границ и их юридической фиксации для присвоения территориям лесного каркаса особого статуса;
2. Внести изменения в законодательство в части чёткого определения полномочий и ответственности органов государственной власти РФ и субъектов РФ по регулированию вопроса, восстановления полноводности гидрологического режима рек.
3. Разработать ИТ инструменты, позволяющие автоматизировать построение реестра приоритетных зон для восстановления полноводности гидрологического режима рек России.
4. Отработать методики по восстановлению полноводности гидрологического режима на базе реализации пилотных проектов и масштабировать полученный опыт на все территории водосборов России.

Приглашаем к проекту заинтересованных специалистов и организаций предлагаем присылать критические замечания и предложения по проекту на адрес АНО РППТ “Уникальные Ландшафты”. Наиболее важные и интересные замечания и предложения будут печататься в следующих номерах журнала.

Список использованных источников

1. Рыбаков, Д. С. Геоэкология - единство наук геологического и географического направлений / Д. С. Рыбаков // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2020. – № 2. – С. 55-65. – DOI 10.17076/geo1175. – EDN AVPMZB.
2. Герасимова, И. А. От модернизации к экологизации. Геоэкология и геосоциальность / И. А. Герасимова // Эпистемология и философия науки. – 2021. – Т. 58, № 1. – С. 8-21. – DOI 10.5840/eps20215812. – EDN EVHDJD.
3. Докучаев В. В. Наши степи прежде и теперь. — М.: Сельхозгиз, 1953. — 84 с. — ISBN 978-5-458-50421-8
4. Лесомелиорация ландшафтов с основами лесоводства / Л. В. Трубачева, О. И. Власова, В. М. Передериева, И. А. Вольтерс // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 10-1. – С. 123-124. – EDN WLVAUZ.
5. Анализ эффективности лесной рекультивации с помощью дистанционных методов / Н. В. Галстян, Н. В. Черняев, С. В. Навалихин, М. Р. Вагизов // Актуальные вопросы лесного хозяйства: материалы V международной молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 11–12 ноября 2021 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. – С. 133-138. – EDN XPBVTU.
6. Геоинформационное моделирование и цифровой мониторинг защитных лесных насаждений: методика интеграции полевых и дистанционных данных (на примере Закамья Республики Татарстан) / И. И. Хуснутдинов, И. И. Гайфуллин, И. И. Халилов [и др.] // International Agricultural Journal. – 2025. – Т. 68, № 2. – DOI 10.55186/25880209_2025_9_2_15. – EDN UXEFJZ.
7. Григорьева О.И. Лесоведение. Рекомендации по восстановлению гидрологического режима малых рек.: учебное пособие для подготовки бакалавров по направлению 35.03.01 «Лесное дело» профиль «Лесное хозяйство» / О. И. Григорьева, Н. В. Беляева, Е.Н. Кузнецов, В.Л. Богданов, Е.Л. Леонов, В.Н. Сазанов. – СПб.: СПбГЛТУ, 2022. – 41 с.

Reference

1. Rybakov, D. S. Geoecology-a science of geological and geographical direction / D. S. Rybakov // Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2020, No. 2, pp. 55-65. – DOI 10.17076/geo1175.
2. Gerasimova, I. A. from modernization to greening. Geoecology and geosociality / I. A. Gerasimova // Epistemology and philosophy of science. – 2021. - Vol. 58, No. 1. - Pp. 8-21. – DOI 10.5840/eps20215812.
3. Dokuchaev V. V. our steppes before and now. Moscow: Selkhozgiz, 1953. 84 p. ISBN 978-5-458-50421-8
4. Forest reclamation of landscapes with the basics of forestry / L. V. Trubacheva, O. I. Vlasova, V. M. Perederieva, I. A. Volters // International Journal of Experimental Education. - 2016. – No. 10-1. - pp. 123-124.
5. Analysis of the effectiveness of forest reclamation using remote methods / N. V. Galstyan, N. V. Chernyaev, S. V. Navalikhin, M. R. Vagizov // Actual issues of forestry : proceedings of the V International Youth Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 11-12, 2021 / St. Petersburg State Forestry Technical University named after S. M. Kirov. Saint Petersburg: Saint Petersburg State Forestry Engineering University named after S. M. Kirov, 2021, pp. 133-138.
6. Geoinformation modeling and digital monitoring of protective forest stands: a methodology for integrating field and remote data (using the example of the Trans-Amur region of the Republic of Tatarstan) / I. I. Khusnutdinov, I. I. Gaifullin, I. I. Khalilov [et al.] // International Agricultural Journal. – 2025. - Vol. 68, No. 2. – DOI 10.55186/25880209_2025_9_2_15.
7. Grigorieva O.I. Forestry. Recommendations for restoring the hydrological regime of small rivers: a tutorial for training bachelors in the direction 35.03.01 "Forestry" profile "Forestry" / O.I. Grigorieva, N.V. Belyaeva E.N. Kuznetsov, V.L. Bogdanov, E.L. Leonov, V.N. Sazanov - St. Petersburg: SPbGLTU, 2022. - 41 p.

ON THE QUESTION OF THE NEED TO CREATE CONDITIONS FOR OPTIMIZING THE WATER BALANCE OF THE RIVER NETWORK BY RESTORING THE HYDROLOGICAL REGIME OF SMALL RIVERS USING FOREST RECLAMATION TECHNOLOGIES AND GEOINFORMATION MODELING

Evgeny Nikolaevich Kuznetsov¹

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor
Head of the Department of Forestry
Institute of Forest and Nature Management
Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov
E-mail: evg_kuznetsov@mail.ru

Evgeny Leonidovich Leonov²

Geophysical Engineer
General Director of the ANO RPPT "Unique Landscapes"
E-mail: leonovell@mail.ru

Ilya Igorevich Demin³

General Director of
Fito Smart LLC

E-mail: pm@agrostab.ru

Vitaly Nikolaevich Sazanov⁴

Biotechnologist of biological treatment facilities,
Scientific Director of the ANO RPPT "Unique Landscapes"

E-mail: sazavit@yandex.ru

Marsel Ravilevich Vagizov.^{1,2}

¹Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Head of the Department of Information Systems and Technologies.

Institute of forestry and nature management

Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov,

²professor of the department information technologies and security systems,

Institute of information systems and geotechnology

Russian state hydrometeorological university

Saint-Petersburg

E-mail: bars-tatarin@yandex.ru

© Кузнецов Е. Н., Леонов Е. Л., Дёмин И. И., Сазанов В. Н., Вагизов М.Р. 2025

Бобровская Р. М.**ДИНАМИКА И ОБЕЗЛЕСИВАНИЕ ЛЕСОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ ПО ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ****Бобровская Рита Маратовна**

Генеральный директор
ООО «Авто Миракл РУС»
г. Москва
E-mail: ritabk@bk.ru

Аннотация: В статье представлена оценка динамики обезлесения и восстановления лесов в Юго-Восточной Азии (Таиланд, Вьетнам, Камбоджа, Мьянма, Лаос). Результаты анализа показывают значительные потери влажных девственных лесов и общей площади лесного покрова в большинстве стран региона, обусловленные различными факторами, включая вырубку лесов, расширение сельскохозяйственных угодий и горнодобывающую деятельность. Несмотря на усилия по восстановлению лесов, темпы обезлесения часто превышают темпы восстановления. Делается вывод о необходимости комплексного подхода к управлению лесными ресурсами, включающего усиление правоприменения, продвижение устойчивых методов землепользования и активное участие местных сообществ.

Ключевые слова: обезлесение, лесовосстановление, влажные девственные леса, незаконная рубка леса, глобальный лесной мониторинг (Global Forest Watch), данные спутниковых снимков.

Abstract: The article presents an assessment of the dynamics of deforestation and reforestation in Southeast Asia (Thailand, Vietnam, Cambodia, Myanmar, Laos). The analysis results show significant losses of wet tropical forests and total forest cover in most countries of the region, caused by various factors, including deforestation, expansion of agricultural land, and mining activities. Despite efforts to restore forests, deforestation rates often exceed recovery rates. It is concluded that there is a need for an integrated approach to forest resource management, including strengthening law enforcement, promoting sustainable land use practices and the active participation of local communities.

Keywords: deforestation, reforestation, moist virgin forests, illegal deforestation, global Forest monitoring (Global Forest Watch), satellite imagery data.

**DYNAMICS AND DEFORESTATION OF FORESTS IN SOUTHEAST ASIA BASED ON
REMOTE SENSING DATA**

Введение. Леса Юго-Восточной Азии играют ключевую роль в поддержании биоразнообразия, регулировании климата и обеспечении средств к существованию миллионов людей. Однако, интенсивная эксплуатация и изменение землепользования приводят к стремительному обезлесению, угрожая экологической устойчивости региона и глобальному климату. В данной статье представлен обзор динамики обезлесения и восстановления лесов в ключевых странах Юго-Восточной Азии с целью выявления основных тенденций и необходимых мер для устойчивого управления лесными ресурсами. Далее, отдельно будут рассмотрены некоторые страны Юго-восточной Азии и анализ потери растительного покрова с 2000 годов, основными источниками информации являлись картографические и web-картографические ресурсы, представляющие оперативный доступ и сводную

статистику по выбранным территориальным единицам. Основные рассмотренные страны в данной статье: Таиланд, Вьетнам, Камбоджа, Мьянма и Индонезия лесопокрытая площадь которых достаточно высокая.

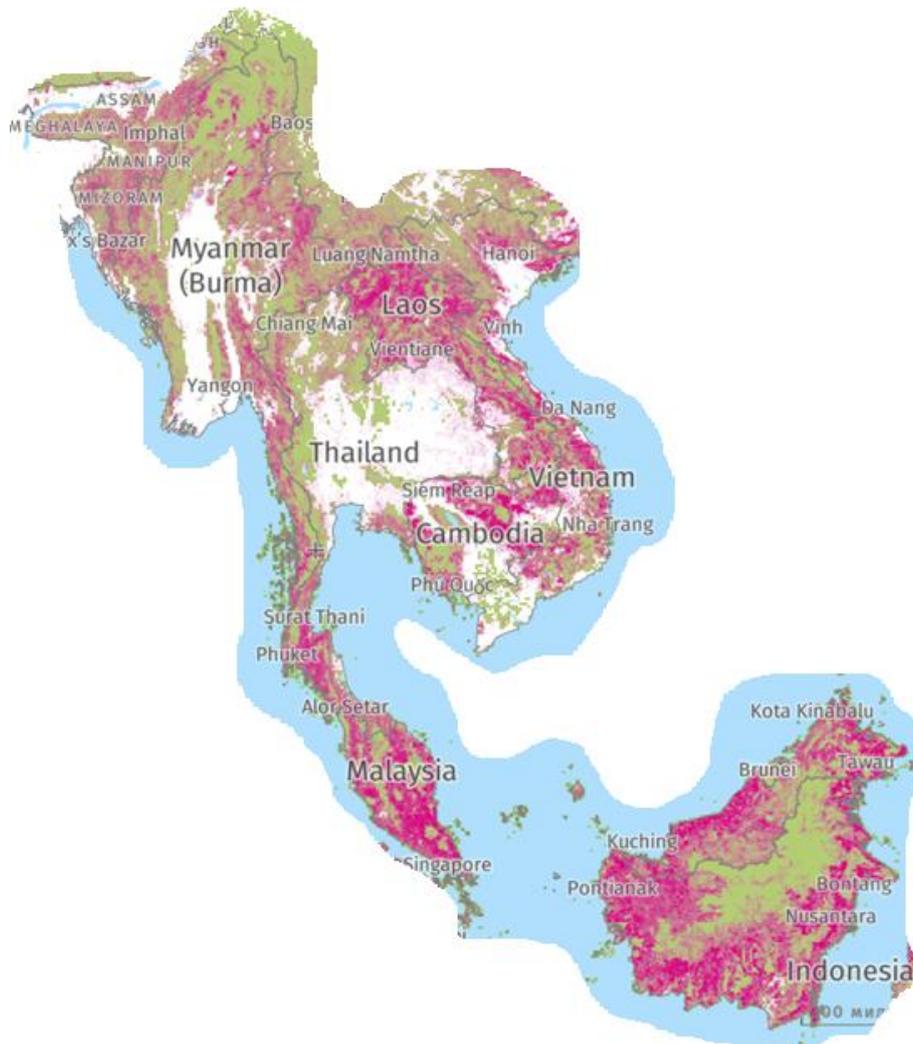


Рисунок 1. Карта обезлесения Юго-Восточной Азии

Figure 1. Maps of deforestation in South Asia Region

Таиланд. Динамика обезлесивания и восстановления лесов в Юго-Восточной Азии, особенно в Таиланде, представляет собой сложную картину. В начале XXI века регион столкнулся со значительными потерями лесов, в основном из-за деятельности в Индонезии и Малайзии, связанных с преобразованием лесов под плантации пальмового масла и добычу полезных ископаемых. В последующие годы динамика обезлесивания в регионе различалась, но в Таиланде, по данным дистанционного зондирования, ситуация выглядит следующим образом.

С 2002 по 2024 год Таиланд потерял 139 кв. км влажных девственных лесов, что составляет 5,2% от их общей площади, и общая площадь этих лесов сократилась на 2,3%.

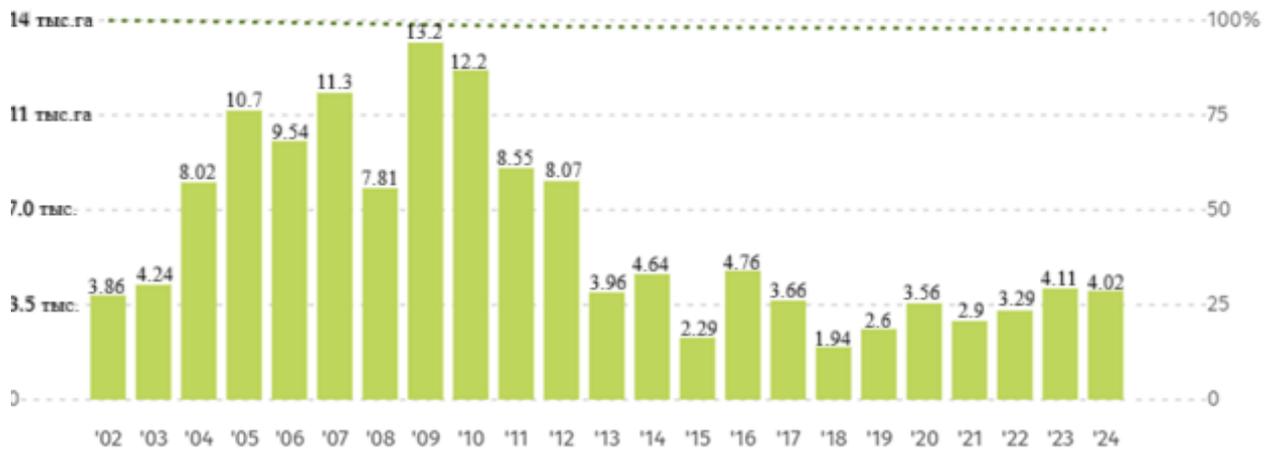


Рисунок 2. Потеря первичных лесов в Таиланде с 2002 по 2024 год

Figure 2. Loss of primary forests in Thailand from 2002 to 2024

В период с 2001 по 2024 год страна потеряла 2,69 млн. га лесного покрова, что соответствует 13% от площади лесного покрова в 2000 году и эквивалентно 1,70 гигатонн выбросов CO₂ без учета прироста лесного покрова.

При этом в 2020 году в Таиланде насчитывалось 16,9 млн. га естественных лесов (33% территории страны), а в 2024 году было потеряно 62,6 тыс. га этих лесов.

Значительную часть плантаций занимает резина (52%), преимущественно каучуковые плантации. С 2021 по 2024 год 70% потерь лесного покрова пришлось на естественные леса, общие потери которых составили 237 тыс. га.

Восемь крупнейших регионов Таиланда отвечают за 53% всех потерь лесного покрова за период 2001-2024 гг., при этом наибольший ущерб понес регион Сураттхани (390 тыс.га).

По данным ФАО, в период с 2015 по 2020 год темпы вырубki лесов в Таиланде составляли 37,6 км² в год 30-е место в мире. Несмотря на эти потери, в Таиланде наблюдаются значительные усилия по восстановлению лесных массивов. В период с 2000 по 2020 год в Таиланде появилось 1,84 млн. га новых лесных массивов (1,4% от общемирового показателя, 7-е место в мире), причем 60% прироста древесного покрова произошло за пределами плантаций.

Десять крупнейших компаний внесли вклад в 39% прироста лесного покрова в период с 2000 по 2020 год, наибольший прирост зафиксирован в Буэнг Кане (127 тыс.га). Темпы восстановления лесов в Таиланде составляли 8,45 га в год в период с 2015 по 2020 год (53 место в мире).

В Таиланде по состоянию на 2010 год на долю 10 крупнейших регионов приходится 46% всей площади лесов. В Чиангмае самая большая площадь лесов — 1,51 млн га по сравнению со средним показателем в 250 тыс. га.

1	Чиангмай	1,51 млн.га
2	Так	1,16 млн.га
3	Мэй Хонг Сон	1,11 млн.га
4	Сураттхани	992 тыс.га
5	Канчанабури	985 тыс.га

По состоянию на 2020 год 33% территории Таиланда занимали естественные леса, а 3,8% — искусственные насаждения.



Рисунок 3. Расположение лесных массивов в Таиланде

Figure 3. Location of forest areas in Thailand

Несмотря на активное обезлесивание и потерю первичных лесов, в Таиланде наблюдаются значительные усилия по восстановлению лесных массивов. Дальнейшее усиление мониторинга, в том числе в облачных районах с использованием SAR-данных, а также поддержка программ восстановления лесов и сохранение влажных экосистем (особенно болот) являются важными факторами для устойчивого управления лесными ресурсами в Таиланде.

Вьетнам. В 2020 году во Вьетнаме насчитывалось 14,5 млн га естественных лесов, что составляло 44% территории страны. По состоянию на 2000 год во Вьетнаме было 16,6 млн. га лесов, что составляло 50% территории страны и 0,41% от общемирового показателя (39-е место).

К 2024 году страна потеряла 125 тыс. га естественных лесов, что эквивалентно 61,4 млн. тонн выбросов CO₂. С 2001 по 2024 год Вьетнам потерял 786 тыс. га влажных девственных лесов, что составляет 21% от их общей площади, и общая площадь этих лесов сократилась на 12%.

Потеря древесного покрова во Вьетнаме за тот же период составила 3,69 млн га, что эквивалентно 22% от площади лесного покрова в 2000 году и 2,66 гигатонн выбросов CO₂.

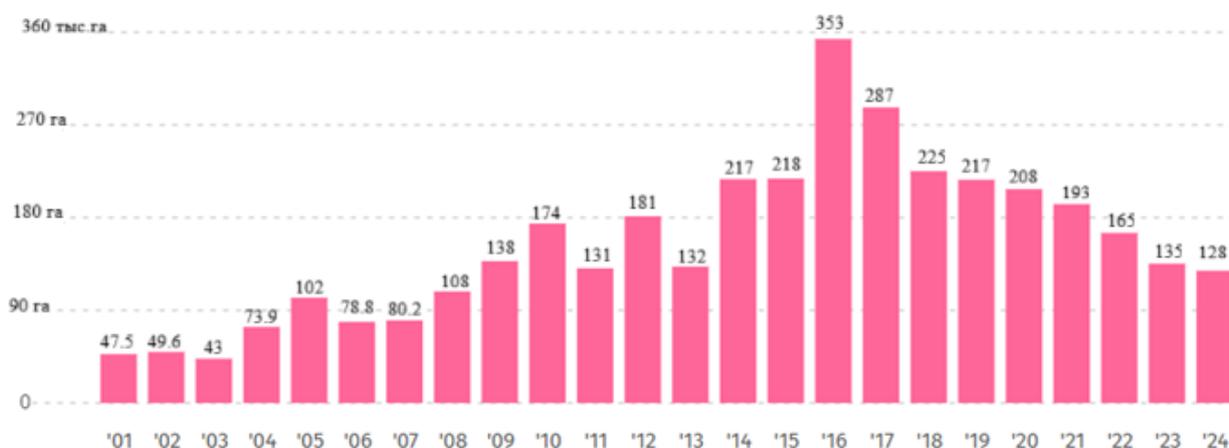


Рисунок 4. Потеря древесного покрова во Вьетнаме

Figure 4. Loss of tree cover in Vietnam

При этом с 2000 по 2020 год Вьетнам увеличил площадь лесного покрова на 1,00 млн. га, что составляет 0,77% от общемирового показателя, занимая 19 место в мире по этому показателю.

Таким образом, динамика обезлесивания во Вьетнаме характеризуется значительными потерями естественных и первичных лесов, а также древесного покрова в целом. Тем не менее, страна также демонстрирует определенные успехи в восстановлении лесов, что указывает на неоднозначный и развивающийся характер ситуации.

Камбоджа. В 2020 году в Камбодже насчитывалось 6,62 млн. га естественных лесов, что составляло 36% территории страны. К 2024 году Камбоджа потеряла 97,2 тыс. га естественных лесов, что эквивалентно 50,6 млн. тонн выбросов CO₂. В период с 2002 по 2024 год страна потеряла 1,48 млн. га влажных девственных лесов, что составляет 51% от их общей площади. Общая площадь влажных девственных лесов сократилась на 34%.

С 2001 по 2024 год Камбоджа потеряла 2,92 млн га лесного покрова, что эквивалентно 33% от площади лесного покрова в 2000 году и 1,75 гигатонн выбросов CO₂. Пять крупнейших регионов Камбоджи отвечают за 55% всех потерь лесного покрова в период с 2001 по 2024 год. Регион Крачех понес наибольшие потери – 382 тыс. га. За период с 2000 по 2020 год в Камбодже произошло чистое сокращение лесного покрова на -2,64 млн. га (-26%).

С 2000 по 2020 год в Камбодже появилось 147 кв. км лесных массивов, что составляет 0,11% от общемирового показателя (72-е место).

По состоянию на 2000 год в Камбодже было 8,83 млн га лесов, что составляло 49% территории страны и 0,22% от общемирового показателя (55-е место). Самым распространенным типом плантаций в Камбодже являются каучуковые, занимающие 865 тыс. га (69% территории плантаций). Регион Ротанкири имеет самую большую относительную площадь плантаций в Камбодже – 22%.

Движущие силы обезлесения

● Твердые сырьевые товары
35,6 тыс.га

● Постоянное сельское хозяйство
2,76 Млн.га

● Населённые пункты и инфраструктура
4,91 тыс.га

Причины временных нарушений

● Вырубка
39,9 тыс.га

● Другие природные возмущения
16,2 тыс.га

● Лесной Пожар
16,3 тыс.га

● Меняющееся культивирование
46,0 тыс.га

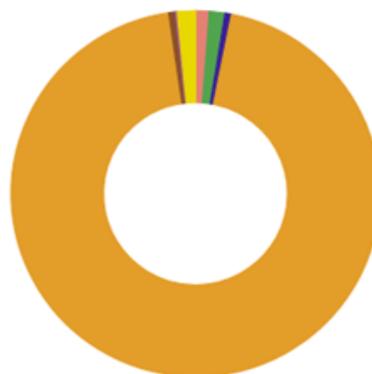


Рисунок 5. Основные причины потери лесов в Камбодже

Figure 5. Main causes of forest loss in Cambodia

В Камбодже наблюдается значительная потеря лесов, как естественных, так и влажных девственных, а также чистое сокращение лесного покрова за период с 2000 по 2020 год. Темпы восстановления лесов относительно невелики. Каучуковые плантации преобладают в структуре плантаций страны.

Мьянма. Обезлесение – серьезная проблема в Мьянме, вызванная несколькими факторами. Основная причина – вырубка лесов, как законная, так и незаконная, для производства древесины, часто на экспорт. Леса также расчищаются под сельскохозяйственные угодья, особенно для выращивания каучука и пальмового масла. Расширение горнодобывающей деятельности, в частности добыча драгоценных камней и минералов, также приводит к уничтожению лесов. Кроме того, для многих сельских общин дрова остаются основным источником энергии, что ведет к вырубке лесов. Строительство дорог, плотин и других инфраструктурных объектов также способствует обезлесению.

Последствия обезлесения значительны. Мьянма обладает богатым биоразнообразием, и многие виды находятся под угрозой из-за утраты среды обитания. Леса играют важную роль в поглощении углерода, а обезлесение способствует выбросам парниковых газов. Отсутствие лесного покрова увеличивает риск эрозии почвы и наводнений. Обезлесение также может лишить местные общины средств к существованию и традиционных источников продовольствия, воды и лекарств.

Правительство Мьянмы принимает меры для борьбы с обезлесением, включая введение запретов на вырубку леса в некоторых регионах и продвижение лесовосстановления. Международные организации также работают с правительством и местными общинами над проектами по лесовосстановлению и устойчивому управлению лесами. Активное привлечение местных общин к управлению лесами имеет решающее значение для успеха этих усилий.

По данным Global Forest Watch, ситуация с лесами в Мьянме в период с 2001 по 2024 год вызывает серьезную обеспокоенность. Мьянма лишилась 806 тысяч гектаров влажных девственных лесов. Это составляет 16% от их общей площади в стране и привело к сокращению общей площади этих ценных лесов на 5,7%. За тот же период общая потеря лесного покрова составила 5,15 миллиона гектаров. При этом 49,5 тыс. га лесного покрова было потеряно из-за пожаров, а 5,10 млн. га — по другим причинам. Это эквивалентно 12% от площади лесного покрова Мьянмы. Эти данные подчеркивают масштаб проблемы обезлесения в Мьянме и необходимость срочных мер для защиты оставшихся лесов.

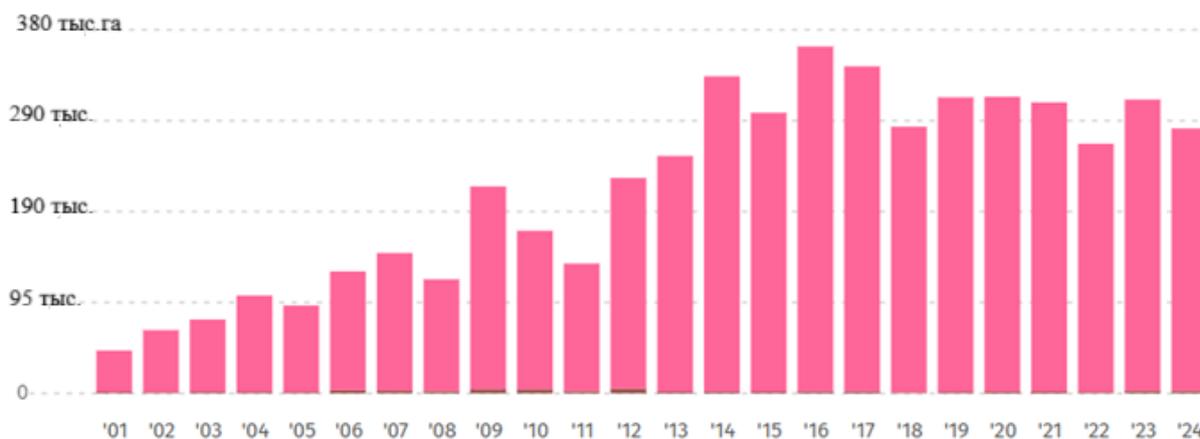


Рисунок 6. Гибель лесов из-за пожаров в Мьянме

Figure 6. Forest loss due to fires in Myanmar

Согласно рисунку 6 годом с наибольшими потерями лесного покрова из-за пожаров за этот период стал 2012, когда из-за пожаров было потеряно 4,66 тыс. га — 2,1% от всех потерь лесного покрова за этот год. В целом, обезлесение остается сложной проблемой в Мьянме, требующей комплексного подхода, который включает в себя усиление правоприменения, продвижение устойчивых методов землепользования и активное участие местных общин.

Лаос. Лаос потерял 1,29 миллиона гектаров влажных девственных лесов, что составляет 25% от общей площади таких лесов в стране, что указывает на серьезную угрозу для этого ценного типа леса.

Общая потеря лесного покрова в Лаосе за этот период составила 5,15 миллиона гектаров, что эквивалентно 12% от лесного покрова. Эти цифры свидетельствуют о существенном обезлесении в

Лаосе и требуют внимания к причинам и последствиям этих потерь, а также разработке и реализации эффективных мер по сохранению оставшихся лесов.

Малайзия. Малайзия потеряла 1,29 миллиона гектаров влажных девственных лесов, что составляет 25% от их первоначальной площади. Общая площадь этих лесов сократилась на 15% за этот период. Общая потеря лесного покрова составила 5,16 миллиона гектаров, что эквивалентно 27% от площади лесов. Показатели указывают на значительное обезлесение в Малайзии, представляющее угрозу биоразнообразию, климату и местным сообществам. Необходимы эффективные меры для защиты оставшихся лесов и восстановления утраченных территорий.

Индонезия. Индонезия потеряла огромные 10,8 миллиона гектаров влажных девственных лесов. Это составляет 34% от первоначальной площади этих лесов, что привело к сокращению их общей площади на 11%.

Общая потеря лесного покрова достигла 9,51 миллиона гектаров, что эквивалентно 32% от площади лесов. Обезлесение привело к выбросу 5,51 гигатонн эквивалента углекислого газа (CO₂-эquiv). Важно отметить, что эти данные не учитывают прирост лесного покрова за тот же период, поэтому реальное воздействие может быть еще более серьезным.



Рисунок 7. Доля по типам изменений лесных Индонезии

Figure 7. Share of forest change types in Indonesia

Эти цифры подчеркивают, что Индонезия сталкивается с серьезной проблемой обезлесения, которая оказывает значительное влияние на биоразнообразие, климат и глобальные усилия по борьбе с изменением климата. Необходимы срочные и масштабные меры для защиты оставшихся лесов и восстановления утраченных территорий.

Вывод. Ситуация с лесными ресурсами в Юго-Восточной Азии остается сложной и неоднозначной. С одной стороны, продолжается масштабное обезлесение, приводящее к потере ценных экосистем и увеличению выбросов парниковых газов. С другой стороны, в регионе наблюдаются значительные усилия по восстановлению лесов и внедрению устойчивых методов землепользования. Дальнейший прогресс в этой области требует комплексного подхода, включающего усиление правоприменения, продвижение устойчивых методов ведения сельского хозяйства и лесного хозяйства, активное участие местных сообществ и развитие международного сотрудничества. Необходимо учитывать социально-экономические факторы, стимулирующие обезлесение, и предлагать альтернативные источники дохода для местного населения, не связанные с эксплуатацией лесных ресурсов. Только в этом случае можно обеспечить долгосрочное сохранение ценных лесных экосистем Юго-Восточной Азии и их устойчивое использование в интересах будущих поколений.

DYNAMICS AND DEFORESTATION OF FORESTS IN SOUTHEAST ASIA BASED ON REMOTE SENSING DATA

Bobrovskaya Rita M.

SEO

Auto Miracle RUS LLC

Moscow

E-mail: ritabk@bk.ru

Список используемых источников

1. Восточно-азиатские тропические леса: современное состояние и перспективы устойчивого развития / Под ред. В.Л. Конюхова. – Владивосток: Дальнаука, 2018. – 320 с.
2. Данилов, Ю.Н. Лесное хозяйство тропиков. - М.: Лесная промышленность, 1980. - 336 с.
3. Замолодчиков, Д.Г., Гитарский, М.Л., Коровин, Г.Н., Курганова, И.Н. Поглощение и эмиссия парниковых газов лесными экосистемами России. М.: Изд-во Географического факультета МГУ, 2005. 208 с.
4. Исаев, А.С. Экологические проблемы лесного сектора России. М.: ГЕОС, 2001. 216 с.
5. Коровин, Г.Н., Сухих, В.И., Бобринский, А.М., Столяр, Д.П. Картографирование лесов России на основе данных дистанционного зондирования. Лесоведение. 2016. № 6. С. 436-448.
6. Всемирный институт ресурсов (WRI). Глобальный лесной дозор (Global Forest Watch). www.globalforestwatch.org.
7. Соколов, В.Е. Биологическое разнообразие лесных экосистем: проблемы и пути сохранения / В.Е. Соколов, А.А. Назаров, С.А. Крылов. - М.: Наука, 2004. - 352 с.
8. Алексеев, А.С., Птичников, А.В., Уткин, А.И. и др. Углеродный баланс лесов России: оценка по данным наземных измерений и моделирования. Лесоведение. 2010. № 3. С. 3-13.
9. Barney, K., & Bidin, A. A. (2017). *Deforestation in Malaysia: Causes, Effects and Policy*. Penerbit UKM.
10. Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., ... & Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, × 342 ×(6160), 850-853.

Reference

1. East Asian Tropical Forests: Current State and Prospects for Sustainable Development / Edited by V.L. Konyukhov. – Vladivostok: Dalnauka, 2018. – 320 p.
2. Danilov, Yu.N. Forest Management in the Tropics. - Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1980. - 336 p.
3. Zamolodchikov, D.G., Guitarsky, M.L., Korovin, G.N., Kurganova, I.N. Absorption and emission of greenhouse gases by Russian forest ecosystems. Moscow: Publishing House of the Geographical Faculty of Moscow State University, 2005. 208 p
4. Isaev, A.S. Ecological problems of the Russian forest sector. Moscow: GEOS 2001. 216 p
5. Korovin, G.N., Sukhov, V.I., Bobrinsky, A.M., Stolyar, D.P. Mapping of Russian forests based on remote sensing data. Forestry. 2016. No. 6. Pp. 436-448.
6. World Resources Institute (WRI). Global Forest Watch (Global Forest Watch). www.globalforestwatch.org.
7. Sokolov, V.E. Biological Diversity of Forest Ecosystems: Problems and Ways of Preservation / V.E. Sokolov, A.A. Nazarov, S.A. Krylov. - Moscow: Nauka, 2004. - 352 p.
8. Alekseev, A.S., Ptichnikov, A.V., Utkin, A.I., et al. Carbon balance of Russian forests: assessment based on ground-based measurements and modeling. Lesovedenie. 2010. No. 3. Pp. 3-13.
9. Barney, K., & Bidin, A. A. (2017). *Deforestation in Malaysia: Causes, Effects and Policy*. Penerbit UKM.
10. Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., ... & Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, × 342 ×(6160), 850-853.

© Р. М. Бобровская 2025

ISBN 978-5-6051126-7-9



Научное издание

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Том 2. Выпуск 2

Научный журнал

Верстка *К. А. Витлева*
Редактор *А. В. Вагизова*

Издательство
ООО «Прспект Науки»
www.prospektnauki.ru E-mail: info@prospektnauki.ru

Подписано в печать 29.08.2025. Формат 60×90/8. Объем 5 печ. л. Тираж 50 экз. Бумага офсетная.

Подготовлено на основе электронной версии, представленной учредителем журнала