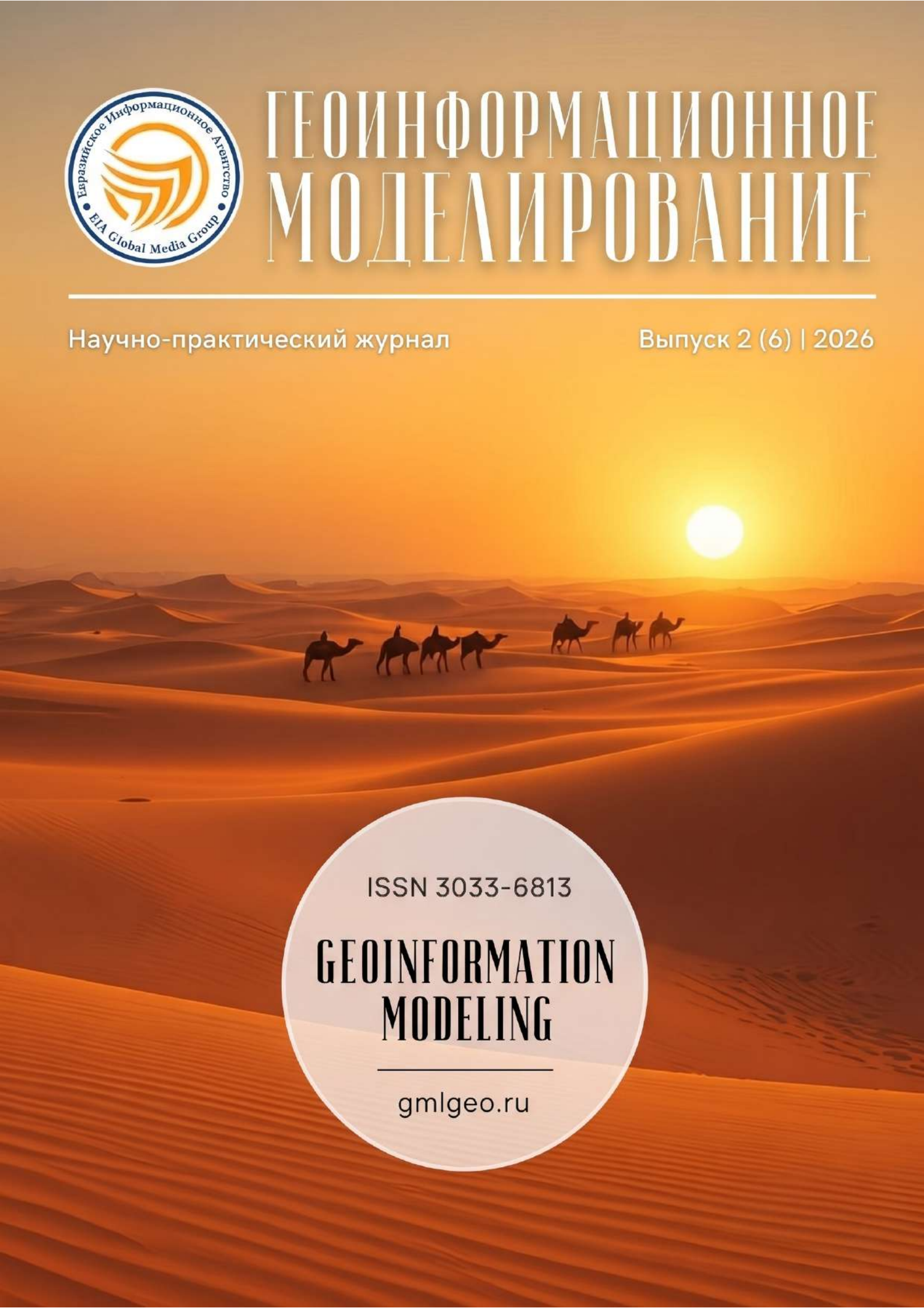


ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Научно-практический журнал

Выпуск 2 (6) | 2026

ISSN 3033-6813

GEOINFORMATION MODELING

gmlgeo.ru

Научно-практический журнал

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Geoinformation modeling

Выпуск 6 (2), 2026

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т:

М. Р. Вагизов, доктор технических наук, доцент (главный редактор),
К. А. Мартын, ассистент (ответственный редактор)
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 Северо-Западного отделения 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
В. Г. Бурлов, доктор технических наук, профессор, почётный наставник
Д. А. Ковалёв, кандидат технических наук, доцент
Н. В. Меламед, кандидат технических наук, доцент
А. С. Дурова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
П. И. Кузин, кандидат технических наук, доцент, почётный изобретатель Министерства обороны РФ
С. А. Назаревич, кандидат технических наук, доцент

Учредитель:
Автономная некоммерческая организация по развитию природного потенциала территорий «Уникальные ландшафты»

Адрес редакции: г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Ульянка, ул. Стойкости, д. 37, литера А. пом.56
E-mail: geogml@bk.ru
Сайт: https://www.gmlgeo.ru

Издатель: «Евразийское Информационное Агентство» (EIA Global Media Group).
Подписано в печать: 31.08.2026.
Технический редактор: Вагизова А. В.
Редактор: Мартын К. А.

ISSN 3033-6813

© АНО РППТ УНЛАНД, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ

Беляев А.К., Биденко С.И., Зайцева И.В., Звездарёв Д.В., Сердитова Н.Е. Система моделей и методов геоконтроллингового регулирования территориальной трудовой активности **3**

Кузан А.В., Фёдоров В. А. Обработка данных дистанционного зондирования Земли для выявления изменений лесного покрова в странах Латинской Америки **14**

Эстер М.В. Современные методы лазерного сканирования в таксации бореальных лесов: возможности, ограничения и экономическая эффективность **24**

Беляев А.К., Биденко С.И., Звездарёв Д.В., Калганов В.А., Сердитова Н.Е. Геоконтроллинг территориальной хозяйственной активности: машинноориентированный онтологический подход к моделированию акторной операционной зоны **39**

РАЗДЕЛ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СТАТИСТИКА

Уйар Д.Х., Мартын И.А. Архитектура информационной системы мониторинга и маршрутизации морских судов в условиях арктической ледовой обстановки **52**

Якушев Д.И. Информация в структуре геоданных: свойство осознанного отображения окружающей действительности **59**

Герасимова А.К. Оценка моделей генративного искуственного интеллекта для проектирования веществ композитной структуры **68**

РАЗДЕЛ ГЕОЭКОЛОГИЯ

Вагизов М.Р., Грязькин А.В., Парамонов С. Г., Шмелёв Г.Б. Оценка сырьевой базы пчеловодства с использованием беспилотных летательных апппаратов **83**

РАЗДЕЛ ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ

SECTION GEOINFORMATICS, CARTOGRAPHY

УДК 656.02

[1]Беляев А.К., [1]Биденко С.И., [2]Зайцева И.В., [3]Звездарёв Д.В., [4]Сердитова Н.Е.

СИСТЕМА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ГЕОКОНТРОЛЛИНГОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТРУДОВОЙ АКТИВНОСТИ

[1]Беляев Александр Константинович
эксперт-аналитик
АО «Сигнал-И»
Санкт-Петербург
E-mail: alexbel3101@yandex.ru

[1]Биденко Сергей Иванович
доктор технических наук, профессор
старший эксперт-аналитик
АО «Сигнал-И»
Санкт-Петербург
E-mail: sibidenko@mail.ru

[2]Зайцева Ирина Владимировна
кандидат физико-математических наук, доцент
заведующий кафедрой высшей математики и физики
ФГБОУ ВР «Российский государственный гидрометеорологический университет»
Санкт-Петербург
E-mail: irina.zaitseva.stv@yandex.ru

[3]Звездарёв Дмитрий Валентинович
кандидат технических наук
Акционерное общество «Научно-исследовательский институт автоматической аппаратуры имени академика В. С. Семенихина» (АО «НИИАА»)
Москва
E-mail: dzvezdarev@mail.ru

[4]Сердитова Наталья Евгеньевна
доктор географических наук, профессор
проректор
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)»
Москва
E-mail: serditovane@miigaik.ru

Аннотация. *Показана территориальность категории «Трудовые ресурсы». Рассмотрены элементы пространства территориальной трудовой активности. Приведены содержательные и пространственные параметры территориальной системы трудовых ресурсов. Дано описание аппарата геоконтроллинга в системе автоматизированного управления территориальной хозяйственной деятельностью. Показан порядок использования аппарата геоконтроллинга в процедурах представления и регулирования территориальной трудовой активности. Обоснован*

состав модельно-методического аппарата поддержки системы геоконтроллинга. Выдоены общие и частные (специальные) методы обработки и анализа контроллинговой геоинформации. Определены «интеллектуальная» и «силовая» составляющие геоконтроллинга территориальной хозяйственной активностью.

Ключевые слова: *региональная хозяйственная деятельность, территориальная трудовая активность, трудовые ресурсы, территориальная система трудовых ресурсов, геоконтроллинг, геомодель, геоинформационная методика.*

A SYSTEM OF MODELS AND METHODS FOR GEOCONTROLLING-BASED REGULATION OF TERRITORIAL LABOR ACTIVITY

Annotation. *The territorial nature of the category of "labor resources" is demonstrated. The elements of the spatial structure of territorial labor activity are considered. The substantive and spatial parameters of the territorial labor resources system are presented. The geocontrolling framework within an automated system for managing territorial economic activity is described. The procedure for applying geocontrolling tools in the representation and regulation of territorial labor activity is presented. The composition of the modeling and methodological framework supporting the geocontrolling system is substantiated. General and specific methods for processing and analyzing geocontrolling geoinformation are identified. The "intellectual" and "enforcement" components of geocontrolling applied to territorial economic activity are defined.*

Keywords: *regional economic activity, territorial labor activity, labor resources, territorial labor resources system, geocontrolling, geomodel, geoinformation methodology.*

Введение. Региональная хозяйственная деятельность (РХД) в широком смысле является территориальной хозяйственной активностью (ТХА) в границах какого-либо района, области, провинции и т. д. Она характеризуется значительным географическим охватом, сложным содержательным функционированием и представляет размещение (расположение), функционирование, взаимодействие и взаимовлияние различных объектов и систем природы, хозяйства, социума, расположенных на (или около) поверхности Земли (ПЗ), в воздухе, воде, ближнем космосе. Сюда входят энергетика, транспорт, промышленность, сельское хозяйство, добыча ресурсов и т. д. Территориальная трудовая активность (ТТА) – полноправный элемент РХД.

РХД - это многомерная среда, где разворачиваются и функционируют субъекты экономики региона, значимым компонентом которой являются трудовые ресурсы (ТР), их трудовая деятельность (ТД), а также их взаимодействие с работодателями. РХД включает физические, временные, виртуальные и когнитивные аспекты и объединяет различные сферы: воздух, сушу, море, космос, киберпространство и информационную среду. Т. е. РХД, являясь организационно-технической структурой, включающей промышленность, инфраструктуру, органы (система) управления, связь, образовательные учреждения, разрешительные, лицензионные, контрольные и др. органы, в большей (промышленность, инфраструктура) или меньшей степени имеют технические средства и специальное оборудование, но, которые, все без исключения, в обязательном порядке, содержат персонал, личный состав, сотрудников, работников и т. д. Даже, как ни странно, различные автономные средства (транспорт, роботы, манипуляторы, исследовательское оборудование. …).

Элемент ТХА «Трудовые ресурсы» или Human Factor (HF) — это совокупность людей, способных к работе и создающих экономические ценности. Проще говоря, это все те, кто может трудиться и приносить пользу производству, хозяйственной деятельности, отраслям экономики.

Наряду с содержательными параметрами (численность, возраст, квалификация, …) ТР имеют и пространственно-географические характеристики – расположение, распределение, удаление, тяготение и т. д. поэтому для управления ими целесообразно применять специальные геоинформационные методы, содержательно направленные на описание и поддержку управления объектами, процессами и явлениями, имеющими координатную привязку к поверхности Земли (ПЗ).

Эти специальные геоинформационные методы в своем современном выражении представляют геоконтроллинг территориальной активностью или геоинформационную поддержку управления территориальными объектами и системами. Система геоеонтроллинга строится посредством специального геоинформационного модельно-методического аппарата

Структура множества специальных моделей и методов геоконтроллинга ТТА. Трудовые ресурсы — это часть населения страны, обладающая совокупностью физических возможностей, знаний и практического опыта для работы в народном хозяйстве. Трудовые ресурсы — это не только люди, уже работающие в данный момент, но и те, кто потенциально может влиться в зозяйственный процесс (т. е. это - трудовой потенциал - ТП). Содержательная структура ТР региона (ТРР) приведена на (рис. 1).

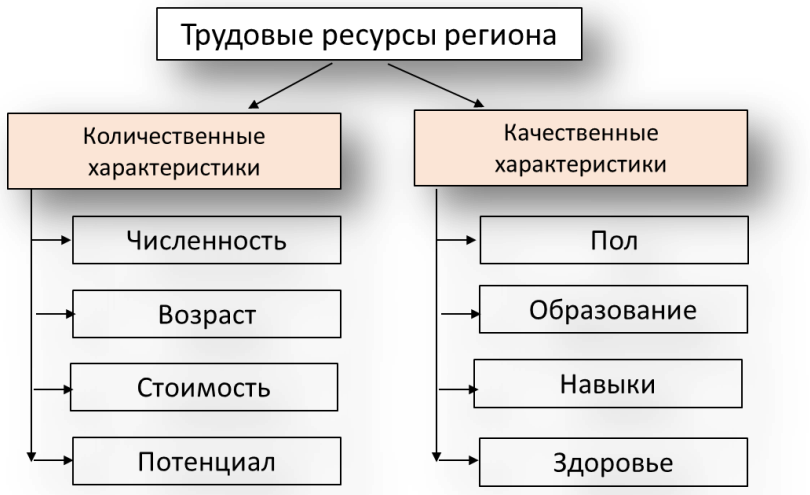


Рисунок 1. Содержательные характеристики трудовых ресурсов региона

Figure 1. Substantive characteristics of regional labor resources

ТР — это не только совокупность работников хозяйственной отрасли, но и стратегический пространственно-временной ресурс государства, формирующий кадровый базис экономики, обеспечивающий устойчивость функционирования морской хозяйственной системы, связность территорий и объектов экономики, воспроизводство профессиональных компетенций и адаптацию отрасли к изменениям внешней среды.

ТР характеризуются как численностью и квалификацией специалистов, так и параметрами их пространственного (территориального) распределения, интенсивностью и направлением кадровых потоков, уровнем территориальной связанности категорий ТР и нанимателей, способностью к самоорганизации и развитию. В пространстве территориальной активности ТР наряду с содержательным описанием – количество, возраст, образование, навыки, стаж, здоровье и т. д., описываются также и геопространственными параметрами (рис. 2) – географическое расположение, места (геолокации) проживания и работы, территориальное распределение трудового потенциала в регионе, трансферт селитебность – работа, объекты (положение) и зоны социального притяжения и тяготения ТР (органы власти, структуры и зоны общественной безопасности (полиция, МЧС,

прокуратура, СК, Росгвардия), места рекреации и ЗОЖ (объекты культуры и отдыха (театры, концертные залы и площадки, библиотеки, кинотеатры), дома отдыха, дачи, садоводства, спортзалы, бассейны, фитнес, сауны, парки, леса, пляжи, водные объекты), места нахождения семьи (детские сады, школы, места работы), локации обучения, области жизнеобеспечения (магазины, здравоохранение (поликлиники, больницы, санатории, профилактории), общественное питание, социальное обеспечение), районы добычи дополнительного питания, жизнеобеспечения и заработка (сбор и добыча природных ресурсов (грибы, ягоды, дичь, зверь, травы, энергоносители, древесина как стройматериал, минералы) – в лесу, в поле, в водоемах, под землей), вектора трудовой миграции в пространстве, территориальные связи с работодателями и т. п.

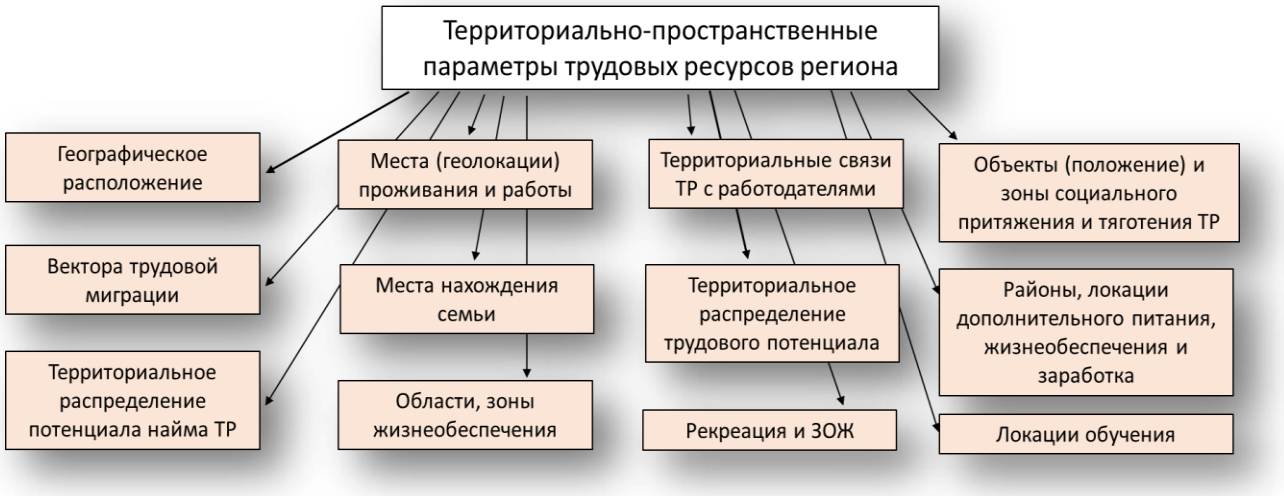


Рисунок 2. Территориально-пространственные параметры и характеристики трудовых ресурсов (ТР) региона: ЗОЖ – здоровый образ жизни

Figure 2. Territorial and spatial parameters and characteristics of the region's labor resources (LR): HLS — healthy lifestyle

Трудовая деятельность (ТД) работников н/х, их взаимодействие с работодателями (прием на работу / увольнение, регулирование производственной деятельности, поощрения / взыскания, повышение квалификации, перевод на другие должности, аттестация рабочих мест, профориентация, организация мед. помощи, вопросы страхования, сдача экзаменов, лицензирование, формирование смен и вахт, …), восстановление их работоспособности (питание, отдых, лечение. профилактика) осуществляется в определенной пространственной локации или зоне на ПЗ, называемой операционным пространством (ОП) или операционным районом (ОР) территориальной трудовой активности (ТТА).

Так как трудовые процессы, трудовая деятельность в регионе имеет пространственный характер (это очевидно в первую очередь для вахтовиков, работников транспорта, членов экспедиций), для их регулирования целесообразно применять специальные геоинформационные методы, содержательно направленные на описание и поддержку управления объектами, процессами и явлениями, имеющими координатную привязку к ПЗ. В той или иной мере этими вопросами занимаются такие территориальные дисциплины, как геомаркетинг, геомониторинг, ГИС-моделирование и др. Но целенаправленно указанные вопросы решаются методами территориального управления или геоинформационной поддержки управления территориальными объектами и системами (ГИУ).

Территориальное управление (ТУ) – это регулирование в геопростанстве действий территориальных объектов (ТО) и систем (геосистем) для решения тех или иных задач, имеющих территориальное или пространственное выражение (интерпретацию). Под ТО (или геообъектом – ГО,

в т. ч. и ТС ТР) понимается организационно-технический или эргадический элемент (территориальная единица (образование), единица ТР, транспортное средство, завод и т. д.), функционирующий на определенном участке территории Земли или в пространстве, рассматриваемом относительно поверхности Земли ПЗ. Территориальная система (ТС) – это совокупность территориальных объектов и регионов (зон, ареалов), также располагающихся и функционирующих на (или относительно) ПЗ. Т. е. здесь учитываются два момента: просто управление и территориальные объекты, процессы и явления.

Методы ГИУ в своей завершенной форме представляют систему геоконтроллинга территорией. Следует отметить, что геоконтроллинг это не самостоятельная управленческая категория, а это модельно-методический аппарат АСУ, связанных с управлением геообъектами, территориальными процессами и геосистемами. Т. е. АСУ с элементами пространственного анализа (рис. 3). Геоконтроллинг существует не отдельно, сам по себе, а функционирует в технико-информационно-программной среде АСУ, пользуется ее подсистемами связи (телекоммуникации), освещения обстановки, сбора и отображения информации.

Геокотроллинг ТХА (в т. ч. МТА, ТС ТР) - это компонент АСУ, включающий систему моделей, методов и процедур представления, обработки и анализа пространственной информации, направленных на поддержку задач регулирования территориальной хозяйственной деятельности (рис. 3).



Рисунок 3. Состав системы геоконтроллинга (геоинформационной поддержки управления): АСУ – автоматизированная система управления; ТХА - территориальная хозяйственная активность; ТТА – трудовая территориальная активность

Figure 3. Structure of the geocontrolling system (geoinformation support for management): ACS — automated control system; TEA — territorial economic activity; TLA — territorial labor activity

Эта геоинформационная поддержка задач регулирования (управления) ТХА / ТТА (геоконторрллинг) заключается в территориальной интерпретации и выполнении классических этапов методики управления подчиненными объектами («силами») на единой геопространственной основе. Т. е. ГИУ или геоконтроллинг привязан к канонической схеме управления «штабом» (субъект управления) какими-либо подчиненными (управляемыми) объектами (рис. 4).

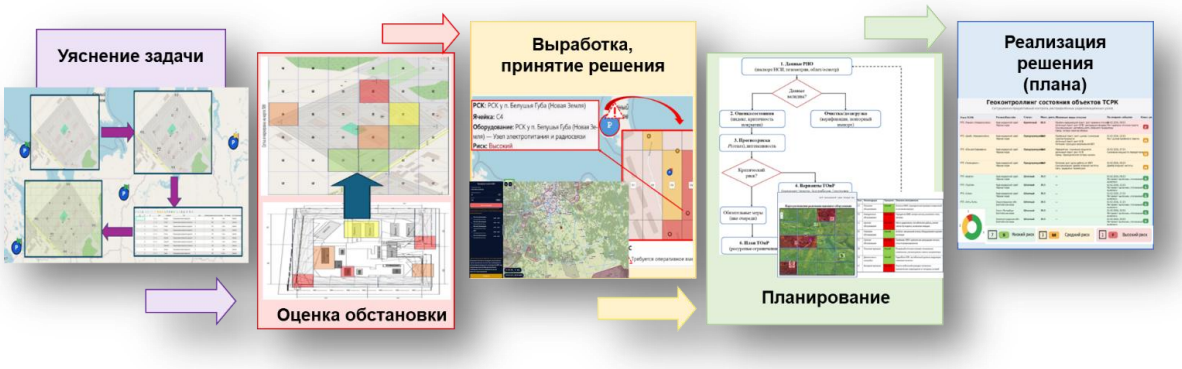


Рисунок 4. Последовательность основных этапов методики управления территориальными объектами (работы руководителя, «штаба»)

Figure 4. Sequence of the main stages of the territorial object management methodology (activities of the manager and the “staff”)

Сюда входят следующие этапы управления: уяснение задачи (выявление (установление) рассогласования (невязки) плана с ходом его исполнения; идентификация ситуации «опасность» (нештатная ситуация); наступление очередного этапа циклического функционирования ТО); оценка обстановки; выработка решения (вариантов действий); планирование; организация выполнения плана (реализации решения).

Единая геопространственная основа или порядок выражается в сетецентрическом позиционировании категории «Обстановка» (рис. 5) за счет изменения топологии классической методики управления.

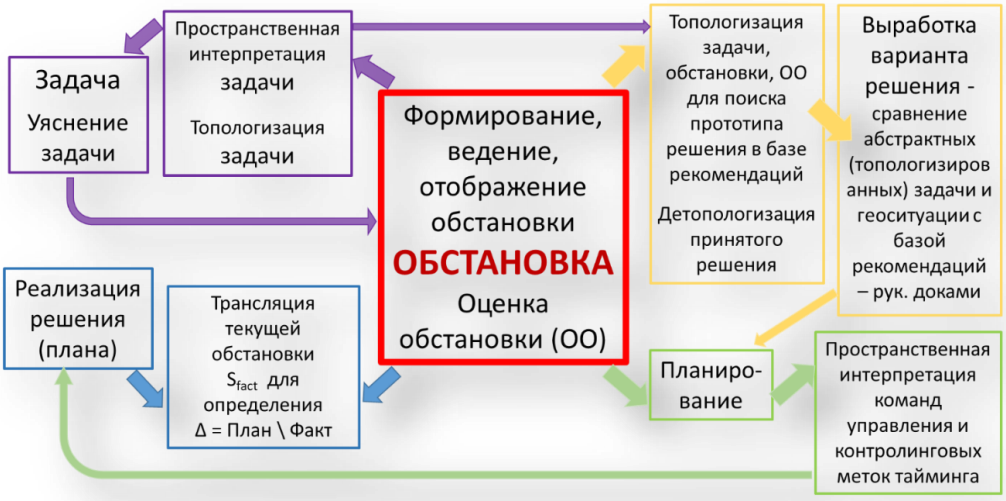


Рисунок 5. Иллюстрация ситуациоцентричности – стержневой базовой роли ведения, отображения и оценки обстановки в методике (технологии) управления ТС: ОО - оценка обстановки; S_{fact} – текущая обстановка (геоситуация); План – командная информация; Факт – информация состояния; \ - операция вычитания множеств

Figure 5. Illustration of situation-centricity – the pivotal role of maintaining, visualizing, and assessing the situation within the territorial system management methodology (technology): SA — situation assessment; S_{fact} – current situation (geosituation); Plan – command information; Fact – status information; \ – set difference operation.

Геоситуация (обстановка) помещается в центр процесса управления ТО и ТС. К ней в процессе управления ТО постоянно циклически обращаются все остальные категории и этапы управления.

Следует отметить, что в своей методической основе геоконтроллинг базируется на общем геоинформационном методе описания и использования геоинформации (данные, имеющие координатную привязку к ПЗ). Сам геоконтроллинг относится к частным методам использования ГИ в конкретных предметных областях. Реализация геоконтроллинга ТТА требует разработки двух субстанциональных инструментов (рис. 6):

1) геомоделей формального представления (описания) объектов, процессов, связей в ТС ТР;

2) геоинформационных методик (алгоритмов, процедур) оценки остановки в ТС ТР и выработки пространственно-содержательных рекомендаций по их оптимальному размещению, подготовке, перемещению, рациональному использованию.

Общие методы обработки ГИ применяются на всех этапах управления для отображения и анализа обстановки. Они включают приемы и способы: ввода, согласования, хранения, преобразования, отображения и анализа геоинформации. Частные методы обеспечивают отдельные этапы управления ТО и включают геоинформационные методы: оценки обстановки, выработки рекомендаций, планирования и реализации решений.

Специальные геоинформационные методы предназначены для поддержки выполнения: а) базовых этапов управления объектами ТС ТР и обеспечивающими системами (оценка обстановки в ТС ТР, выработка рекомендаций, планирование, реализация решения) и; б) решения задач применения этих конкретных территориальных трудовых ресурсов в определенном районе (акватории) и реальной окружающей среде.

Разработка геоинформационных методов поддержки управления осуществляется с помощью моделей представления геоинформации в АСУ. В состав комплекса общих геомоделей входят две группы: модели геопространств и модели геоструктур;

Состав группы моделей геопространств определяется, исходя из требований к форме представления и использования геоинформации со стороны этапов управления и методов геоинформационной поддержки принятия решений. Так, анализ обстановки В ТС ТР требует: полноты данных обстановки; представление многомерности данных; отображение связей и взаимодействий объектов ТС ТР; учет решаемых задач. Этому требованию отвечает модель геоинформационного пространства. Для выработки решения необходимо выполнять предварительную оценку обстановки, первичную селекцию геоинформации, которая должна выделить (высветить) те районы, которые представляют наибольший интерес. Для этого служит модель анаморфированного пространства.

Для прогнозирования развития ситуации в ТС ТР, отображения динамики объектов обстановки, оценки последствий принимаемых решений вводится геофункциональное пространство. Для содержательного обобщения и территориального абстрагирования обстановки при выработке решения, то есть для перехода к форме тактических документов служит модель абстрактного функционального пространства.

Для перехода в множество рекомендаций при поиске прототипа решения используется абстрактное топологическое пространство, получаемое в результате перехода конкретной географической ситуации к ее схематическому представлению.

Пространственные представления служат средой для построения геоструктур – территориальных объектов, регионов и систем. Модель геообъекта (ГО) (а также ТС ТР) является формализацией отдельного конечного элемента пространства. Она описывает положение, форму, протяженность и другие параметры собственного пространства объекта или явления на или

относительно конкретной ЗП, а также осуществляет территориальное выражение его содержательных характеристик.

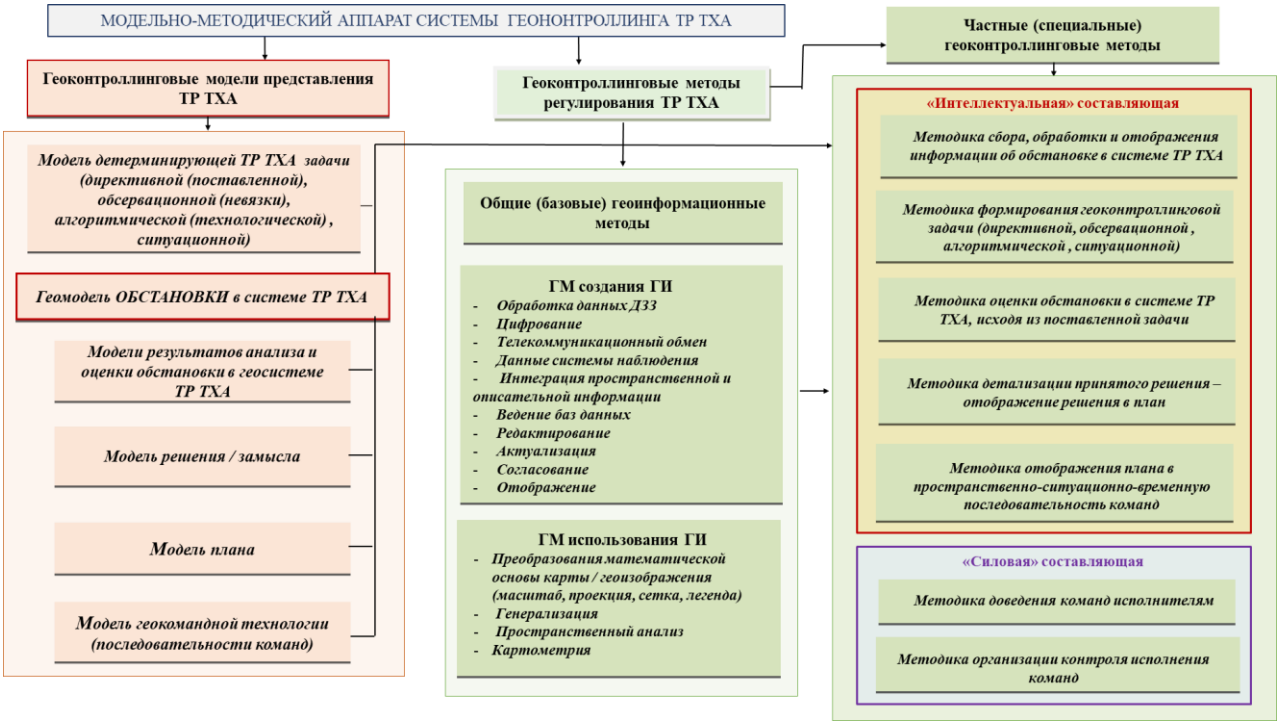


Рисунок 6. Схема модельно-методического аппарата системы геоконтроллинга трудовых ресурсов (ТР) территориальной хозяйственной активности (ТХА): ГИ – геоинформация, ДЗЗ –дистанционное зондирование Земли; ГМ – геоинформационный метод (методика)

Figure 6. Framework of the model-and-methodological apparatus of the geocontrolling system for labor resources (LR) in territorial economic activity (TEA): GI – geoinformation; ERS – Earth remote sensing; GIM – geoinformation method (methodology).

Георегион (ГР) – это множество однородных ГО с установленными между ними относительно простыми связями и отношениями (близость, соседство, расстояние, плотность, …). Геосистема – это совокупность ГО и ГР, связвнных отношениями как пространственной, так и содержательной упорядоченности.

В геопространствах с помощью базовых геоструктур строятся модели категорий и этапов управления – обстановки, решения, плана, оценки обстановки и т.д. По составу эти модели строятся из ГО, ГР и ГС. По содержанию они включают конкретное формализованное геоинформационное описание и наполнение понятий и процедур управления. Таким образом отображаются пространственные и содержательные параметры категорий и этапов управления. С помощью этих моделей осуществляется непосредственная геоинформационная поддержка управления (регулирование) ТО и ТС в АСУ.

С помощью моделей и методов представления и использования геоинформации строятся геоинформационные технологии поддержки управления ТО. Сформулированные требования на разработку базиса геомоделирования в АСУ отличаются учетом особенностей геопространственных представлений и согласованных геоинформационных потребностей на этапах управления ТО, что обеспечивает адекватность системы геомоделирования процессам автоматизированного управления территориальными объектами и системами.

Отличие концепции ГИУ состоит в определении подходов к организации пространственной формы представления содержания этапов управления ТО, что наряду с другими элементами АСУ обеспечивает построение единого геоинформационного процесса поддержки работы ЛПР и органа управления по управлению территориально распределенными объектами. Совокупность положений, составляющих содержание концепции представления и использования геоинформации при управлении территориальными объектами, обеспечивает построение комплекса моделей и методов геоинформационной поддержки управления территориальными объектами и системами.

Система специальных геоконтроллинговых моделей представления ТР ТХА включает:

- модель задачи, которая детерминирующей целевые действия, например, работодателей в системе ТР ТХА, исходя из: а) указаний «сверху»; б) установленного цикла производственной деятельности комплекса; в) превышения допустимой невязки (расхождения) между командой и ее выполнением; г) появления угрозы или возникновения нештатной ситуации;

- геомодель ОБСТАНОВКИ в системе ТР ТХА, которая является системообразующей для всех этапов геоконтроллинговой технологии;

- геомодели результатов анализа и оценки обстановки в системе ТР ТХА (исходя из решаемой задачи);

- геомодель решения или замысла;

- геомодель плана – пространственно-содержательное детализированное решение;

- модель геокомандннй технологии - последовательности команд, которые будут выдаваться на управляемый объект (УО) в установленный момент времени или при наступлении определенного события.

Структура геоконтроллинговых методов регулирования ТР ТХА содержит:

а) общие (базовые) геоинформационные методы:

- геоинформационный метод (ГМ) создания ГИ (Обработка данных ДЗЗ, Цифрование, Телекоммуникационный обмен, Обработка данных системы наблюдения, Интеграция разноплодной, пространственной и описательной информации, априорных и оперативных данных, Ведение баз данных ОИ и ГИ, Редактирование, Актуализация, Согласование ГИ, Отображение ГИ)

- ГМ использования ГИ (Преобразования математической основы карты / геоизображения - масштаб, проекция, сетка, легенда, Генерализация – пространственная и содержательная, Утрирование, Пространственный анализ, Картометрия, Топологизация, Хоологизация, Анаморфирование, Интермодальные преобразования);

б) частные (специальные) геоконтроллинговые методы (например, геоконтроллинга ТР в ТХА):

- «Интеллектуальная» составляющая (Методика сбора, обработки и отображения, поддержания в актуальном состоянии информации об обстановке в ТС «ТР ТХА», Методика формирования и хорологизации текущей геоконтроллинговой задачи (директивной, обсервационной, алгоритмической, ситуационной) по функционированию ТР в ТХА, Методика оценки обстановки в геосистеме «Операционный район (ОР) функционирования ТР в ТХА», исходя из поставленной (решаемой) задачи по базовым составляющим «Свои – «Противник» – Среда», а также хорологизация полученных оценок, Методика выработки пространственно-содержательных рекомендаций по решению стоящей задачи (топологизация (в т. ч. анаморфирование) задачи и реальной геоситуации – поиск прототипа в множестве типовых рекомендаций – адаптация и детопологизация (хорологизация) прототипа к реальной географии и содержанию действий в ОР), Методика детализации принятого решения – отображение решения в план, Методика отображения плана в пространственно-ситуационно-временную последовательность команд – геокомандную технологию (ГКТ));

- «Силовая» составляющая (Методика доведения команд исполнителям в соответствии с последовательностью команд ГКТ, Методика организации контроля исполнения команд системой ТР в геосреде, Методика контроля выполнения команд исполнителями - установления рассогласования (невязки) командной информации с информацией о состоянии и действиях управляемого объекта)

Наполнение описанных геоконтроллинговых моделей и процедур конкретными данными обстановки, разработка реализующих ГМ алгоритмов и программ являются основой модельно-методической поддержки геоинформационного управления функционированием ТС ТР в многосферном пространстве территориальной хозяйственной активности.

Заключение. Система моделей и методов геоконтроллинга ТР региона базируется на следующих положениях.

1. ТР наряду с содержательными имеет и терр-пространственные параметры.
2. Управление геообъектом «ТР» может в полной мере базироваться на современном концепте автоматизированного территориального управления – геоконтроллинге региональной активностью.
3. Геоконтроллинг трансформирует классическую последовательную методику управления подчиненными объектами в ситуационноцентрическую, ставящую в процедурную основу территориальную сетецентрическую категорию «Обстановка».
4. Необходимое условие геоконтроллинга - киберфизическая способности системы ТХА. Достаточное требование - операционная способность этой системы. Т. е. геоконтроллинг – не вещь в себе, а элемент территориальной АСУ.
5. Система моделей и методов геоконтроллинга ТХА – открытая структура, обеспечивающая при необходимости включение новых территориальных объектов, систем, процессов, геоинформационных управляющих методик процедур и алгоритмов.

Предложенная структура системы геоконтроллинговх моделей и методов регулирования территориальной системы ТР позволит в условиях киберфизической способности системы ТХА реализовать полный цикл управления специфическим геообъектом «ТР» с учетом его геопространственных свойств и параметров.

Список использованных источников

1. Ансофф И. Управление трудовыми ресурсами. - М.: Юнити, 2008. – 288 с.
2.Биденко С.И., Храмов И.С., Миляков Д.Ф. и др. Геоконтроллинг и моделирование рисковой территориальной активности / под ред. проф. С. И. Биденко: монография. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. – 263 с.
3.Биденко С.И., Самотонин Д.Н., Яшин А.И. Геоинформационные модели и методы поддержки управления: Монография. - СПб: Изд-во ФВУ ПВО, 2003. – 224 с.
4.Бородулина С.А., Пантина Т.А. Формирование моделей управления пространством морской экономики Российской Федерации // Транспортное дело России. - 2024. - № 5 - С. 151 – 153. https://elibrary.ru/item.asp?id=69366042.
5.Бурыкин А.А. Современные тенденции и технологии управления человеческими ресурсами: монография / А.А. Бурыкин, С.В. Колесниченко. — СПБ. Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2023. — 178 с. — ISBN 978-5-9509-0554-4.
6.Веснин В.Р. Трудовые ресурсы. - М.: Экономистъ, 2009. – 299 с.
7.Истомин Е.П., Истомин И.Е., Биденко С.И. и др. Геоинформатика, геоинформационные технологии, геоинформационное управление // Гидрометеорология и экология. – 2025. - № 78. – С. 113 – 127.
8.Комарицын А.А., Яшин А.И., Биденко С.И. Геоинформационные системы поддержки принятия решения. - СПб: Изд-во СПбГЭТУ, 2004. – 97 с.

9.Облаухова М.В. Трудовые ресурсы в рыночной экономике. Новосибирск: НГУ, 2007. – 277 с.
10.Панамарев Г.Е., Биденко С.И. Геоинформационная поддержка управления сложными территориальными объектами и системами: монография. - Новороссийск: Изд-во ГМА, 2011. – 202 с.
11.Сердитова Н.Е., Белоцерковский А.В. Моделирование сложных эколого-экономических систем и принцип максимума производства энтропии – СПб.: РГГМУ, 2008 – 96 с.
12.Ширинкина Е.В. Управление трудовыми ресурсами / Е.В. Ширинкина, Н.Ю. Кауфман. — М, КНОРУС, 2020 — 226 с.
13.Якушев Д.И., Биденко С.И. Геоинформационные управляющие системы и технологии: монография. - СПб: Изд-во СПбУ МВД, 2014. – 248 с.
14.Ясакова Н.Н. Социальная организация труда // Труд и социальные отношения. – 2016. – № 2 – С. 43 –50.

References

1.Ansoff I. Human Resources Management. - M.: Unity, 2008. - 288 p.
2.Bidenko S.I., Khramov I.S., Milyakov D.F. et al. Geocontrolling and modeling of risky territorial activity / edited by prof. S. I. Bidenko: monograph. – St. Petersburg: Publishing house of ETU "LETI", 2025. – 263 p.
3.Bidenko S.I., Samotonin D.N., Yashin A.I. Geoinformation models and methods of management support: Monograph. - St. Petersburg: Publishing house of FVU PVO, 2003. - 224 p.
4.Borodulina S.A., Pantina T.A. Formation of models for managing the space of the maritime economy of the Russian Federation // Transport business of Russia. - 2024. - No. 5 - P. 151 - 153. https://elibrary.ru/item.asp?id=69366042.
5.Burykin A.A. Modern trends and technologies of human resource management: monograph / A.A. Burykin , S.V. Kolesnichenko. - St. Petersburg. Publishing house of the State University of Maritime and Inland Shipping named after adm. S. O. Makarov, 2023. - 178 p. - ISBN 978-5-9509-0554-4.
6.Vesnin V.R. Labor resources. - M.: Economist, 2009. - 299 p.
7.Istomin E.P., Istomin I.E., Bidenko S.I. et al. Geoinformatics , geoinformation technologies, geoinformation management // Hydrometeorology and Ecology. - 2025. - No. 78. - P. 113 - 127.
8.Komaritsyn A.A., Yashin A.I., Bidenko S.I. Geoinformation systems for decision support. - St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg Electrotechnical University , 2004. - 97 p.
9.Oblaukhova M.V. Labor resources in a market economy. Novosibirsk: NSU, 2007. – 277 p.
10.Panamarev G.E., Bidenko S.I. Geoinformation support for managing complex territorial objects and systems: monograph. - Novorossiysk: Publishing house of the State Medical Academy, 2011. - 202 p.
11.Serditova N.E., Belotserkovsky A.V. Modeling of complex ecological-economic systems and the principle of maximum entropy production – St. Petersburg: Russian State Medical University, 2008 – 96 p.
12.Shirinkina E.V. Human Resources Management / E.V. Shirinkina , N.Yu. Kaufman. - M, KNORUS, 2020 - 226 p.
13.Yakushev D.I., Bidenko S.I. Geoinformation control systems and technologies: monograph. - St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs, 2014. - 248 p.
14.Yasakova N.N. Social organization of labor // Labor and social relations. - 2016. - No. 2 - P. 43 -50.

A SYSTEM OF MODELS AND METHODS FOR GEOCONTROLLING-BASED REGULATION OF TERRITORIAL LABOR ACTIVITY

Belyaev Alexander K.
Expert Analyst
JSC Signal-I

Saint Petersburg
E-mail: alexbel3101@yandex.ru

Bidenko Sergey I.
Doctor of Technical Sciences, Professor
Senior Expert Analyst
JSC Signal-I
Saint Petersburg
E-mail: sibidenko@mail.ru

Zaitseva Irina V.
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Head of the Department of Higher Mathematics and Physics
Russian State Hydrometeorological University
Saint Petersburg
E-mail: irina.zaitseva.stv@yandex.ru

Zvezdarev Dmitry V.
Candidate of Technical Sciences
Deputy Director General
JSC NIIAA
Moscow
E-mail: dzvezdarev@mail.ru

Serditova Natalia E.
Doctor of Geographical Sciences, Professor
Vice-Rector
Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)
Moscow
E-mail: serditovane@miigaik.ru

© Беляев А.К., Биденко С.И., Зайцева И.В., Звездарёв Д.В., Сердитова Н.Е., 2026

УДК 528.8:630

Кузан А.В., Фёдоров В.А.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕСНОГО ПОКРОВА В СТРАНАХ ЛАТИНСКОЙ АМЕРИКИ

Кузан Анастасия Васильевна
Студент 1 курса
Кафедра Автоматизации технологических процессов и производств,
Высшая школа технологий и энергетики,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
Санкт-Петербург
E-mail: kuzan.nastya@mail.ru

Фёдоров Виктор Аркадьевич
Ассистент кафедры Автоматизации технологических процессов и производств
Высшая школа технологий и энергетики
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
Санкт-Петербург
E-mail: fedorovbrook@gmail.com

Аннотация. *В статье рассмотрены возможности обработки данных дистанционного зондирования Земли для оценки изменений лесного покрова в странах Латинской Америки на примере Бразилии, Перу и Боливии. Цель работы - показать, какие открытые спутниковые данные и программные средства можно использовать для сравнения лесного покрова за длительный период, а также определить территории, где за последние 20-30 лет происходили наиболее заметные потери древесного покрова. В качестве основных источников использованы данные Landsat, Sentinel-2, Global Forest Watch и материалы MAAP. В работе описаны бесплатные программы SNAP и QGIS, приведен сравнительный анализ трех стран и показаны примеры спутниковых изображений "до/после". Сделан вывод о том, что в Бразилии, Перу и Боливии спутниковые данные позволяют достаточно надежно выявлять зоны вырубок, пожаров и горнодобывающего освоения, однако для правильной интерпретации важно отделять собственно рубки от других причин потери древесного покрова.*

Ключевые слова: *дистанционное зондирование Земли, лесной покров, Латинская Америка, Бразилия, Перу, Боливия, спутниковые снимки, Landsat, Sentinel-2, вырубки леса.*

EARTH REMOTE SENSING DATA PROCESSING FOR DETECTING FOREST COVER CHANGES IN LATIN AMERICAN COUNTRIES

Abstract. *This paper examines the use of Earth remote sensing data processing to assess forest cover change in Latin America, using Brazil, Peru and Bolivia as examples. The aim of the study is to show which*

open satellite datasets and software tools can be used to compare forest cover over a long period and to identify territories where the most significant tree cover losses occurred over the last 20-30 years. Landsat, Sentinel-2, Global Forest Watch and MAAP materials were used as the main data sources. The paper describes the free software packages SNAP and QGIS, presents a comparative analysis of three countries and includes before/after satellite image examples. It is concluded that satellite data can reliably detect areas of logging, fires and mining-related forest loss in Brazil, Peru and Bolivia, but correct interpretation requires separating logging from other drivers of tree cover loss.

Keywords: *Earth remote sensing, forest cover, Latin America, Brazil, Peru, Bolivia, satellite imagery, Landsat, Sentinel-2, forest logging.*

Введение. Изменение лесного покрова относится к числу наиболее заметных экологических и хозяйственных проблем современности. Для стран Латинской Америки эта тема особенно важна, потому что здесь расположены крупные массивы тропических лесов, прежде всего в пределах Амазонии. Потеря древесного покрова в регионе связана не только с рубками, но и с расширением сельского хозяйства, пожарами, строительством дорог, добычей золота и иной хозяйственной деятельностью [12-17].

Для исследования таких процессов удобнее всего использовать данные дистанционного зондирования Земли. Спутниковые снимки позволяют сравнивать состояние территории за разные годы, выделять участки сокращения лесов, рассчитывать индексы растительности и анализировать пространственное размещение очагов обезлесения [1-6]. В учебной работе это особенно полезно, потому что значительная часть данных и программ доступна бесплатно.

Цель статьи - показать, как можно обработать и сопоставить спутниковые данные для анализа изменений лесного покрова в Латинской Америке на примере Бразилии, Перу и Боливии. Эти страны выбраны потому, что они относятся к числу заметных очагов потери лесов в Амазонии и при этом различаются по масштабу процессов и ведущим причинам изменения лесного покрова [12-17].

Источники данных для анализа изменений лесного покрова. Для изучения изменений лесного покрова в учебной и исследовательской практике наиболее удобны открытые данные Landsat Collection 2 Level-2 и Sentinel-2 Level-2A [7; 8]. Данные Landsat имеют большое значение для продолжительного временного ряда: с их помощью можно сравнивать состояние лесов на рубеже 1990-х, 2000-х, 2010-х и 2020-х годов. Пространственное разрешение 30 м уступает Sentinel-2, но для анализа крупных очагов обезлесения и общей динамики его вполне достаточно.

Снимки Sentinel-2 удобны для более детального анализа современного состояния территории. Они позволяют точнее видеть границы свежих вырубок, линейные нарушения, очаги пожаров и участки, затронутые добычей полезных ископаемых. Визуально эти материалы особенно полезны на этапах проверки результатов, когда необходимо понять, действительно ли выделенная область относится к лесным потерям, а не, например, к сезонному изменению растительности или облачности [6; 8].

Для первичной оценки страны или региона полезны сервисы Global Forest Watch и Global Forest Review. Они дают статистику потери древесного покрова, позволяют быстро увидеть общую динамику с 2001 года и помогают выбрать территории, которые стоит изучать более подробно. Для Амазонии ценны и материалы MAAP, где уже выделены основные очаги обезлесения, пожаров и горнодобывающего освоения по странам и субрегионам [15-17].

Программы для обработки спутниковых снимков. Для учебного исследования по теме изменения лесного покрова наиболее доступными являются бесплатные программы SNAP и QGIS [9-11]. SNAP подходит для предобработки сцен, расчета спектральных индексов и базовых операций с растрами. В этой программе удобно готовить данные к дальнейшему сравнению: обрезать сцену по контуру территории, приводить данные к единой системе координат и рассчитывать показатели NDVI или NDMI.

QGIS более удобна как универсальная геоинформационная среда. В ней можно сопоставлять слои за разные годы, строить карты, выполнять классификацию, накладывать административные границы и оформлять итоговые иллюстрации. Для учебной задачи особенно полезен Semi-Automatic Classification Plugin, который упрощает загрузку и предварительную обработку снимков Landsat и Sentinel [10; 11].

На практике логично использовать обе программы совместно: в SNAP выполнять подготовку исходных данных, а в QGIS - анализ изменений и оформление карт. Такой подход прост, реалистичен и подходит для бакалаврской учебной работы, поскольку не требует платного программного обеспечения и позволяет получить наглядный результат [1; 2].

Материалы и методика сравнительного анализа. Работа имеет обзорно-аналитический характер с элементами сравнительного пространственного анализа. В качестве временного интервала выбран период 2001-2024 гг., так как именно для этого промежутка доступны сопоставимые данные Global Forest Watch по потерям древесного покрова, а также современные обзоры по очагам обезлесения в Амазонии [12-17].

В качестве объектов сравнения выбраны Бразилия, Перу и Боливия. Все три страны относятся к Латинской Америке и входят в число важнейших территорий Амазонского бассейна, но различаются по масштабу потерь. Бразилия выделяется самым большим абсолютным объемом утраты древесного покрова. Боливия демонстрирует очень высокую интенсивность изменений в последние годы. Перу характеризуется меньшим суммарным объемом потерь, но в нем ярко выражены отдельные очаги, связанные с пожарами, сельским освоением и золотодобычей [12-17].

Сравнение проводилось в несколько этапов. Сначала определялись открытые наборы данных и программы обработки. Затем по статистике Global Forest Watch оценивался суммарный объем потерь древесного покрова за 2001-2024 гг. После этого использовались карты и аналитические материалы MAAP для уточнения того, где именно концентрировались основные очаги обезлесения и какие факторы, вероятнее всего, их формировали. Наконец, для наглядности подбирались спутниковые изображения "до/после", показывающие реальное изменение поверхности на отдельных участках.

Сравнительный анализ изменений лесного покрова в выбранных странах. По данным Global Forest Watch, за период 2001-2024 гг. Бразилия потеряла около 73 млн га древесного покрова, что соответствует примерно 14% лесной площади 2000 года. Для Перу аналогичный показатель составил около 4,4 млн га, или 6%, а для Боливии - около 9,8 млн га, или 15% [12-14]. Уже эти значения показывают, что Бразилия лидирует по абсолютным потерям, а Боливия выглядит особенно проблемной по относительной глубине сокращения лесного покрова.

Материалы MAAP за 2024 год уточняют пространственную картину. В Амазонии наибольшая доля обезлесения пришлась на Бразилию, затем на Боливию и Перу. При этом пожары оказались особенно разрушительными для Бразилии и Боливии, тогда как в Перу важную роль играли как пожары, так и нелесные драйверы, прежде всего расширение хозяйственного освоения и золотодобыча [16].

Таким образом, сравнение трех стран показывает, что само понятие "потеря древесного покрова" не тождественно вырубке. В Бразилии и Боливии значительная часть изменений в

последние годы связана с пожарами, которые часто возникают на уже нарушенных или осваиваемых территориях. В Перу заметную роль играют локальные, но хорошо различимые очаги расчистки леса под добычу золота и сельское освоение. Поэтому при интерпретации спутниковых данных важно сочетать статистику потерь с визуальным анализом конкретных участков.

Таблица 1. Сравнение изменений лесного покрова в Бразилии, Перу и Боливии

Table 1. Comparison of forest cover change in Brazil, Peru and Bolivia

Страна	Потеря древесного покрова 2001-2024, млн га	Снижение к уровню 2000 г., %	Ключевые зоны потерь	Вероятные основные причины	Общая оценка
Бразилия	73,0	14	штаты Пара, Мату-Гросу, Рорайма; дорожные коридоры BR-163, BR-230, BR-364	пожары, сельхозосвоение, добыча золота, расчистка под пастбища	наибольшие абсолютные потери в выборке
Перу	4,4	6	Мадре-де-Дьос, Укаяли, центральная и юго-восточная Амазония	золотодобыча, локальные вырубки, пожары, новые сельхозколонии	меньший масштаб, но высокая концентрация очагов
Боливия	9,8	15	департамент Санта-Крус, границы Бени и Пандо, район Мадиди	пожары, соево-скотоводческое освоение, добыча золота	самая высокая относительная потеря среди трех стран

Ниже приведены карты очагов потери лесов и пожаров в Бразилии, Боливии и Перу. Они позволяют увидеть, что пространственный рисунок изменений отличается: в Бразилии и Боливии хорошо заметны крупные полосы и кластеры нарушений вдоль хозяйственно освоенных фронтов, а в Перу выражены более локальные, но отчетливые очаги в центральной и юго-восточной части Амазонии [16].

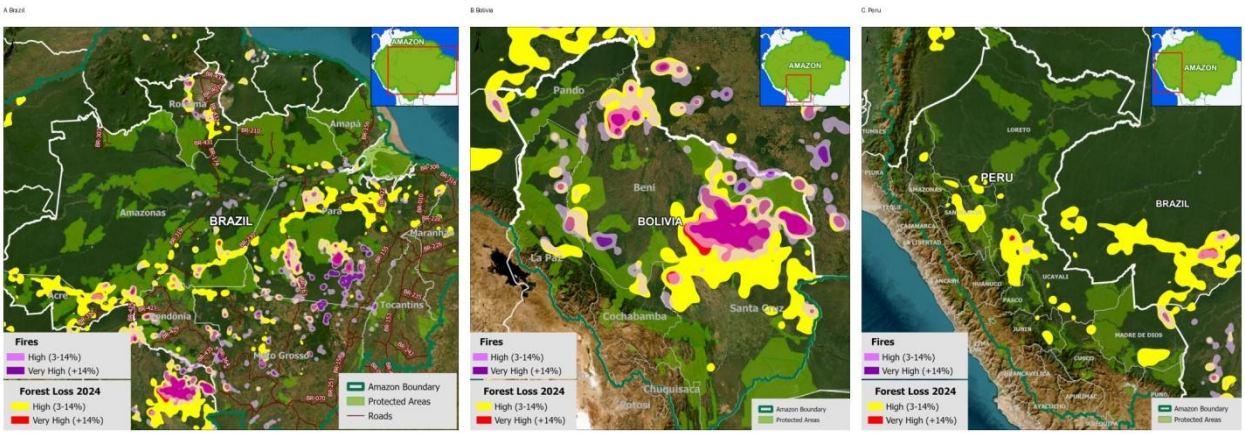


Рисунок 1. Сравнение очагов потери лесов и пожаров в Бразилии, Боливии и Перу в 2024 г.

Figure 1. Comparison of forest loss and fire hotspots in Brazil, Bolivia and Peru in 2024

Источник: MAAP #229, 2025.

Где проводились вырубки и иные формы обезлесения за последние 20-30 лет. В Бразилии наиболее заметные очаги лесных потерь в последние десятилетия концентрировались в южной и восточной частях Амазонии, где леса пересекаются с зонами активного сельскохозяйственного освоения. По материалам MAAP, в 2024 году крупные очаги были связаны с юго-востоком бразильской Амазонии, прежде всего со штатами Пара и Мату-Гросу, а также с дорожными коридорами BR-163, BR-230 и BR-364 [16]. Дополнительно на отдельных территориях усилилось влияние золотодобычи, особенно в пределах или рядом с землями коренных народов.

В Перу потери древесного покрова в наибольшей степени проявлялись в южной и центральной Амазонии. Для юга страны особенно характерна золотодобыча в районе Мадре-де-Дьос, где изменение поверхности на спутниковых снимках выражается очень резко: лес сменяется пятнами вскрытого грунта и отвалов. В центральной части перуанской Амазонии важным фактором становятся новые сельскохозяйственные колонии, что также хорошо фиксируется по разновременным снимкам [16; 17].

В Боливии одна из наиболее проблемных зон - департамент Санта-Крус и соседние территории юго-восточной Амазонии. Здесь материалы MAAP показывают сильную связь между обезлесением и пожарами, которые сопровождают продвижение сельскохозяйственного фронта. Кроме того, в боливийской Амазонии выделяются отдельные участки, затронутые добычей золота, например район национального парка Мадиди [16; 17].

Следовательно, ответ на вопрос о том, где именно проводились вырубки, должен формулироваться осторожно. Спутниковые данные надежно показывают участки потери лесного покрова, но не всегда автоматически различают рубку, пожар, горнодобывающую расчистку или иную форму преобразования территории. Поэтому наиболее корректно говорить о вероятных очагах антропогенного обезлесения, которые затем уточняются по визуальным признакам и дополнительным данным.

Примеры спутникового сравнения участков "до/после". Сильной стороной дистанционного зондирования является наглядность. Даже без сложной классификации разновременные снимки позволяют увидеть, насколько быстро меняется ландшафт. На рисунках 4-6 приведены три примера для стран выборки. Они помогают понять, как выглядят реальные изменения поверхности на спутниковых изображениях и почему такие материалы полезны для учебного сравнительного анализа.

На примере Бразилии видно, как внутри сплошного лесного массива формируется новый участок расчистки. Для Перу хорошо заметна динамика золотодобычи: площадь нарушенной поверхности увеличивается и приобретает характерный светлый оттенок. В Боливии показан участок в районе Мадиди, где за два года появляется заметный новый очаг нарушения. Такие изображения особенно важны для объяснения результатов, потому что позволяют перейти от абстрактной статистики к реальной картине трансформации лесной территории [16; 17].

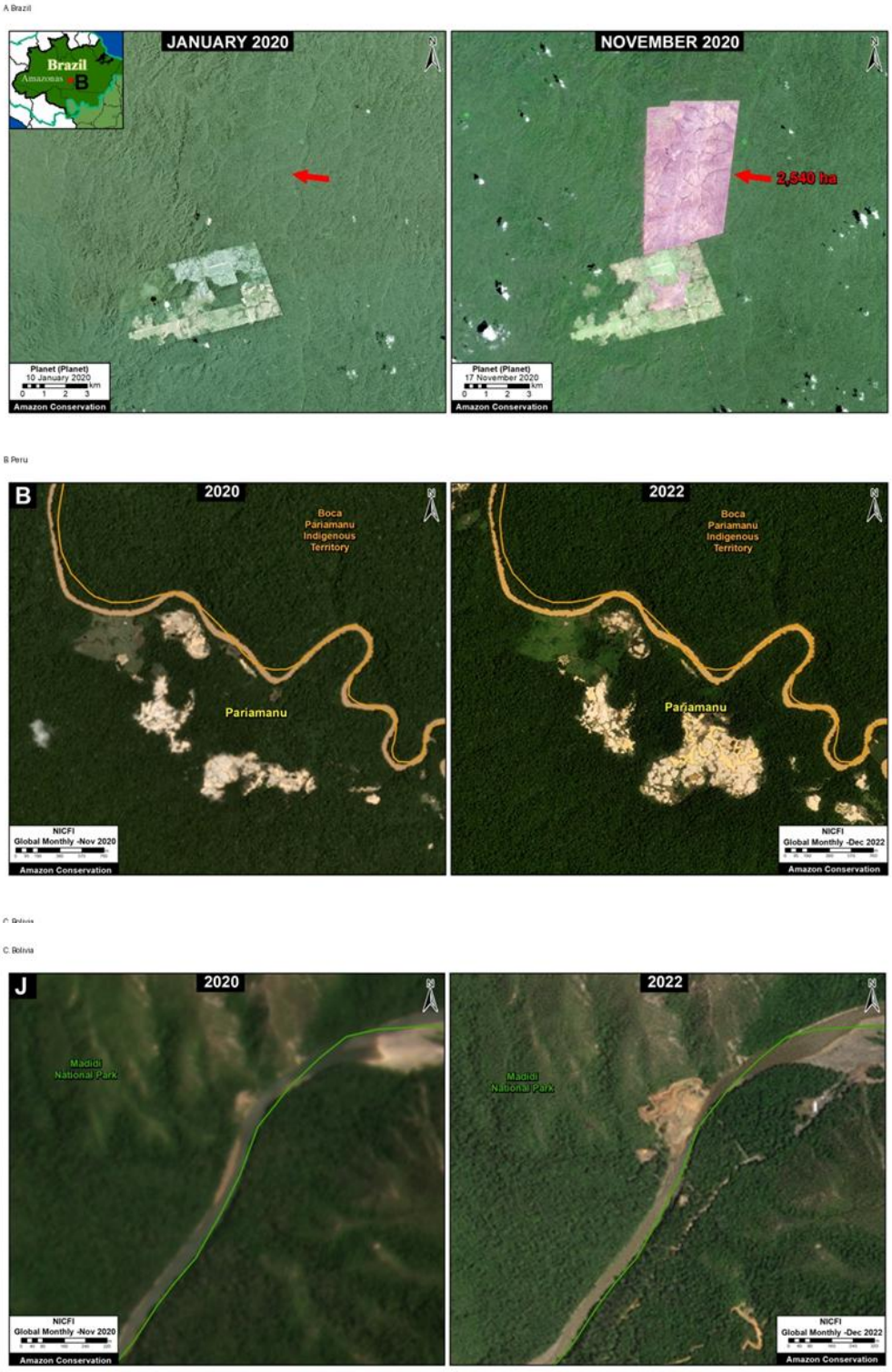


Рисунок 2. Примеры спутникового сравнения участков "до/после" в Бразилии, Перу и Боливии

Figure 2. Examples of before/after satellite image comparison in Brazil, Peru and Bolivia

Источник: MAAP / Planet / NICFI, 2021-2023.

Практические рекомендации по обработке снимков. Для учебной работы по теме изменения лесного покрова можно предложить следующий простой алгоритм. Сначала в EarthExplorer, EO Browser или Copernicus Browser подбираются разновременные сцены по одной и той же территории. Для анализа долгого интервала удобно брать Landsat, а для современной детализации - Sentinel-2 [7; 8; 18-20].

Затем данные приводятся к сопоставимому виду: выбираются сцены без сильной облачности, выполняется обрезка по территории исследования, при необходимости проводится атмосферическая коррекция и рассчитываются базовые индексы, прежде всего NDVI. После этого в QGIS можно наложить снимки разных лет и визуально выделить участки, где зеленый сплошной покров сменился открытой поверхностью, мозаикой нарушений или выгоревшими площадями [1-3; 9-11].

На завершающем этапе полезно сочетать два подхода. Первый - количественный: сравнение статистики потери древесного покрова и площади нарушений. Второй - качественный: дешифрирование конкретных спутниковых изображений. Для студенческой статьи такое сочетание особенно удачно, потому что оно не перегружает работу сложными алгоритмами, но показывает реальный навык анализа пространственных данных.

Даже на базовом уровне можно получить содержательный результат: выбрать страну или несколько стран, подобрать архивные сцены, сравнить спутниковые изображения и сделать аргументированный вывод о том, как и где изменялся лесной покров.

Заключение. Проведенный анализ показал, что тема обработки данных дистанционного зондирования Земли для изучения изменений лесного покрова в Латинской Америке является актуальной как для науки, так и для практики экологического мониторинга. На примере Бразилии, Перу и Боливии видно, что открытые данные Landsat, Sentinel-2, Global Forest Watch и материалы MAAP позволяют выявлять как долгосрочные тенденции, так и конкретные очаги современных изменений [7-17].

Сравнение трех стран показало, что Бразилия имеет наибольшие абсолютные потери древесного покрова, Боливия - наиболее выраженную относительную потерю среди выбранных стран, а Перу отличается более локальными, но хорошо читаемыми очагами обезлесения. Особенно важен вывод о том, что спутниковые данные фиксируют не только собственно вырубки, но и пожары, расширение сельского хозяйства и последствия добычи золота. Поэтому корректный анализ требует сочетать статистические показатели с визуальной интерпретацией снимков.

Практическая ценность такой работы состоит в том, что даже на базе бесплатных источников и программ можно выполнить сравнительный анализ за 20-30 лет, показать реальные пространственные различия и сделать обоснованные выводы о трансформации лесного покрова. Следовательно, дистанционное зондирование Земли выступает эффективным инструментом для учебного и прикладного изучения обезлесения в странах Латинской Америки.

Список использованных источников

1. Подрядчикова Е. Д. Мониторинг растительного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли. 2025. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-rastitelnogo-pokrova-na-osnove-dannyh-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli

2. Дега Н. С. Интеграция данных дистанционного зондирования и геоинформационного анализа в систему мониторинга и управления лесными экосистемами. 2025. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-dannyh-distantsionnogo-zondirovaniya-i-geoinformatsionnogo-analiza-v-sistemu-monitoringa-i-upravleniya-lesnymi

3. Гнеденко А. Е. Картографирование динамики лесов севера Московской области по спутниковым снимкам серии Landsat. 2023. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kartografirovanie-dinamiki-lesov-severa-moskovskoy-oblasti-po-sputnikovym-snimkam-serii-landsat

4. Коптев С. В. Оценка состояния и динамики лесов Архангельской области с использованием технологий дистанционного зондирования. 2024. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sostoyaniya-i-dinamiki-lesov-arhangelskoy-oblasti-s-ispolzovaniem-tehnologiy-distantsionnogo-zondirovaniya

5. Аббазов В. Р. Сегментация лесных рубок по паре космических снимков Sentinel-2 в зимний период. 2024. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/segmentatsiya-lesnyh-rubok-po-pare-kosmicheskih-snimkov-sentinel-2-v-zimniy-period
6. Капиталинин Д. Ю. Оценка качества таксации по результатам лесотаксационного дешифрирования данных спутниковой съемки Sentinel-2. 2024. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-taksatsii-po-rezultatam-lesotaksatsionnogo-deshifrirovaniya-dannyh-sputnikovoy-semki-sentinel-2
7. Landsat Collection 2 Level-2 Science Products // U.S. Geological Survey. URL: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products
8. Sentinel-2 // Copernicus Data Space Ecosystem. URL: https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-missions/sentinel-2
9. SNAP Download - Science Toolbox Exploitation Platform // ESA STEP. URL: https://step.esa.int/main/download/snap-download/
10. QGIS Web Site. URL: https://qgis.org/ (дата обращения: 11.05.2026).
11. Semi-Automatic Classification Plugin // QGIS Plugins. URL: https://plugins.qgis.org/plugins/SemiAutomaticClassificationPlugin/
12. Brazil Deforestation Rates & Statistics // Global Forest Watch. URL: https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/BRA/
13. Peru Deforestation Rates & Statistics // Global Forest Watch. URL: https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/PER/
14. Bolivia Deforestation Rates & Statistics // Global Forest Watch. URL: https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/BOL/
15. RELEASE: Global Forest Loss Shatters Records in 2024, Fueled by Massive Fires // World Resources Institute. URL: https://www.wri.org/news/release-global-forest-loss-shatters-records-2024-fueled-massive-fires
16. MAAP #229: Amazon Deforestation & Fire Hotspots 2024 // Monitoring of the Andes Amazon Program. URL: https://www.maapprogram.org/amazon-deforestation-fire-hotspots-2024/
17. MAAP #178: Gold Mining Deforestation Across the Amazon // Monitoring of the Andes Amazon Program. URL: https://www.maapprogram.org/mining-deforestation-amazon/
18. EO Browser // Sentinel Hub. URL: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/
19. Copernicus Browser // Copernicus Data Space Ecosystem. URL: https://browser.dataspace.copernicus.eu/
20. EarthExplorer // U.S. Geological Survey. URL: https://earthexplorer.usgs.gov/

References

1. Podryadchikova E. D. Monitoring of vegetation cover based on Earth remote sensing data. 2025. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-rastitelnogo-pokrova-na-osnove-dannyh-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli
2. Dega N. S. Integration of remote sensing data and geoinformation analysis into the monitoring and management system for forest ecosystems. 2025. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-dannyh-distantsionnogo-zondirovaniya-i-geoinformatsionnogo-analiza-v-sistemu-monitoringa-i-upravleniya-lesnymi
3. Gnedenko A. E. Mapping the dynamics of forests in the northern part of the Moscow Region using satellite images from the Landsat series. 2023. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kartografirovanie-dinamiki-lesov-severa-moskovskoy-oblasti-po-sputnikovym-snimkam-serii-landsat

4. Koptev S. V. Assessment of the state and dynamics of forests in the Arkhangelsk Region using remote sensing technologies. 2024. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sostoyaniya-i-dinamiki-lesov-arhangelskoy-oblasti-s-ispolzovaniem-tehnologiy-distantsionnogo-zondirovaniya
5. Abbazov V. R. Segmentation of forest logging based on a pair of Sentinel-2 satellite images in the winter period. 2024. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/segmentatsiya-lesnyh-rubok-po-pare-kosmicheskih-snimkov-sentinel-2-v-zimniy-period
6. Kapitalinin D. Yu. Assessment of the quality of forest inventory based on the results of forest inventory interpretation of Sentinel-2 satellite imagery. 2024. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-taksatsii-po-rezultatam-lesotaksatsionnogo-deshifrirovaniya-dannyh-sputnikovoy-semki-sentinel-2
7. Landsat Collection 2 Level-2 Science Products // U.S. Geological Survey. URL: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products
8. Sentinel-2 // Copernicus Data Space Ecosystem. URL: https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-missions/sentinel-2
9. SNAP Download - Science Toolbox Exploitation Platform // ESA STEP. URL: https://step.esa.int/main/download/snap-download/
10. QGIS Web Site. URL: https://qgis.org/ (дата обращения: 11.05.2026).
11. Semi-Automatic Classification Plugin // QGIS Plugins. URL: https://plugins.qgis.org/plugins/SemiAutomaticClassificationPlugin/
12. Brazil Deforestation Rates & Statistics // Global Forest Watch. URL: https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/BRA/
13. Peru Deforestation Rates & Statistics // Global Forest Watch. URL: https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/PER/
14. Bolivia Deforestation Rates & Statistics // Global Forest Watch. URL: https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/BOL/
15. RELEASE: Global Forest Loss Shatters Records in 2024, Fueled by Massive Fires // World Resources Institute. URL: https://www.wri.org/news/release-global-forest-loss-shatters-records-2024-fueled-massive-fires
16. MAAP #229: Amazon Deforestation & Fire Hotspots 2024 // Monitoring of the Andes Amazon Program. URL: https://www.maapprogram.org/amazon-deforestation-fire-hotspots-2024/
17. MAAP #178: Gold Mining Deforestation Across the Amazon // Monitoring of the Andes Amazon Program. URL: https://www.maapprogram.org/mining-deforestation-amazon/
18. EO Browser // Sentinel Hub. URL: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/
19. Copernicus Browser // Copernicus Data Space Ecosystem. URL: https://browser.dataspace.copernicus.eu/
20. EarthExplorer // U.S. Geological Survey. URL: https://earthexplorer.usgs.gov/

EARTH REMOTE SENSING DATA PROCESSING FOR DETECTING FOREST COVER CHANGES IN LATIN AMERICAN COUNTRIES

Kuzan Anastasia V.
First-year student
Department of Automation of Technological Processes and Production,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design
Saint Petersburg
Email: kuzan.nastya@mail.ru

Viktor Arkadyevich Fedorov
Assistant, Department of Automation of Technological Processes and Production
Higher School of Technology and Energy
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design
Saint Petersburg
E-mail: fedorovbrook@gmail.com

© Кузан А.В., 2026

УДК 004.9

Эстер М.В.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В ТАКСАЦИИ БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСОВ: ВОЗМОЖНОСТИ, ОГРАНИЧЕНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Эстер Мария Вадимовна
Общество с ограниченной ответственностью «Центр космических технологий и услуг»
614038, Россия, г. Пермь, ул. Лаврова, 14
E-mail: ester.maria17@mail.ru

Аннотация. *В статье рассмотрены современные методы лазерного сканирования, применяемые в лесной таксации бореальных лесов. Проведен сравнительный анализ возможностей воздушного и мобильного лазерного сканирования при оценке таксационных характеристик древостоев. Рассмотрены ограничения применения различных платформ в условиях сложной пространственной структуры бореальных лесов, а также вопросы интеграции данных дистанционного зондирования. Показано, что дальнейшее развитие технологий связано со снижением объема наземных работ и повышением уровня автоматизации инвентаризации лесных ресурсов.*

Ключевые слова: *бореальные леса, лесная таксация, воздушное лазерное сканирование, мобильное лазерное сканирование, ALS, MLS, дистанционное зондирование.*

MODERN LASER SCANNING METHODS IN BOREAL FOREST INVENTORY: CAPABILITIES, LIMITATIONS, AND ECONOMIC EFFICIENCY

Abstract. *The article examines modern laser scanning methods used in boreal forest inventory. A comparative analysis of the capabilities of airborne and mobile laser scanning for assessing forest stand inventory characteristics is carried out. The limitations of various platforms under the conditions of the complex spatial structure of boreal forests, as well as issues related to the integration of remote sensing data, are considered. It is shown that further technological development is associated with reducing the volume of ground-based surveys and increasing the level of automation in forest resource inventory.*

Keywords: *boreal forests, forest inventory, airborne laser scanning, mobile laser scanning, ALS, MLS, remote sensing.*

Введение. Бореальные леса, или тайга, представляют собой крупнейший биом планеты, занимающий обширные территории Северного полушария, они простираются через Россию, Канаду, страны Скандинавии и Аляску. По различным оценкам на их долю приходится около 30 % мировой площади лесов, при этом значительная часть бореальной зоны расположена на территории Российской Федерации [1]. Благодаря значительным запасам органического вещества в надземной биомассе и почвенных горизонтах, бореальные экосистемы играют ключевую роль в глобальном углеродном цикле, выступая одним из важнейших долговременных резервуаров углерода. Значительная часть органического углерода сосредоточена в торфяных и мерзлотных почвах, накопленного в течение тысячелетий. Изменение состояния бореальных лесов способно существенно повлиять на баланс парниковых газов и динамику климатической системы в глобальном масштабе [2].

Помимо экологической функции, бореальные леса обладают высокой социально-экономической значимостью. Они являются важнейшим источником древесного сырья для лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности, обеспечивают занятость населения, поддерживают развитие удаленных регионов и формируют существенную часть экспортного потенциала многих стран, включая Россию. В условиях перехода к низкоуглеродной экономике возрастает значение лесов как объекта углеродного регулирования и природно-климатических решений, что предъявляет повышенные требования к точности оценки запасов древесины, биомассы и углеродных пулов [3].

В последние десятилетия бореальные леса испытывают возрастающее воздействие климатических изменений и антропогенных факторов. Повышение среднегодовых температур, увеличение продолжительности вегетационного периода, деградация многолетней мерзлоты и изменение гидрологического режима приводят к трансформации структуры лесных экосистем. Одновременно наблюдается рост частоты и интенсивности лесных пожаров, вспышек массового размножения вредителей и других природных нарушений. Лесные пожары являются одним из ключевых факторов, определяющих динамику углеродного баланса бореальной зоны, поскольку вызывают прямые выбросы парниковых газов, изменяют структуру древостоев и запускают долгосрочные сукцессионные процессы. Поэтому необходим оперативный мониторинг состояния лесов и регулярное обновление материалов лесоустройства [4,5].

Традиционные методы лесной таксации, основанные на проведении наземных измерений на пробных площадях, остаются важнейшим источником информации о состоянии лесного фонда. Однако их применение в бореальных регионах сопряжено с рядом существенных ограничений. К ним относятся высокая трудоемкость и стоимость полевых работ, ограниченная пространственная непрезентабельность выборок, субъективность отдельных измерений, а также сложность обследования удаленных или труднодоступных территорий. Кроме того, длительные интервалы между циклами лесоустройства не позволяют своевременно учитывать последствия природных нарушений и быстро меняющуюся структуру лесных экосистем [6].

Развитие технологий дистанционного зондирования Земли открывает новые возможности для совершенствования лесотаксационных работ. Среди современных инструментов особое место занимает лазерное сканирование (Lidar, Light Detection and Ranging), обеспечивающее получение высокоточных трехмерных данных о пространственной структуре лесного покрова. Воздушное лазерное сканирование (Airborne Laser Scanning, ALS) позволяет эффективно оценивать таксационные показатели на больших территориях, тогда как мобильное лазерное сканирование (Mobile Laser

Scanning, MLS) обеспечивает детальное описание отдельных деревьев и нижних ярусов растительности. Интеграция данных различных платформ позволяет формировать цифровые двойники лесных экосистем и переходить к непрерывному мониторингу лесных ресурсов [7].

Несмотря на значительный потенциал лазерного сканирования, его широкое внедрение в практику лесной таксации сопровождается рядом методических и организационных проблем. Среди них следует отметить влияние окклюзии в сомкнутых древостоях, ограничения алгоритмов сегментации деревьев, зависимость качества оценок от параметров съемки, а также высокие требования к вычислительным ресурсам и квалификации специалистов. Важным аспектом остается оценка экономической эффективности внедрения данных технологий в условия крупных лесных территорий и необходимости оптимизации затрат на лесоустроительные работы.

Актуальность исследования связана с необходимостью повышения оперативности и точности лесотаксационных работ в условиях возрастающей динамики природных нарушений и расширения задач устойчивого лесоуправления. Несмотря на активное развитие технологий лазерного сканирования, недостаточно изучены вопросы выбора оптимальных платформ съемки, интеграции данных различных источников, снижения зависимости от наземных измерений и оценки экономической эффективности дистанционной таксации. Это требует систематизации существующих подходов и определения перспективных направлений развития технологий лазерного сканирования применительно к бореальным лесам.

В статье рассматриваются современные методы лазерного сканирования, применяемые в лесной таксации бореальных лесов, оцениваются их информативность, технологические ограничения и экономическая эффективность. Отдельно рассматриваются возможности воздушного и мобильного лазерного сканирования, интеграции мультисенсорных данных и снижения зависимости лесотаксационных работ от наземных измерений. Также анализируются факторы, ограничивающие переход к дистанционным технологиям инвентаризации лесных ресурсов, и перспективы создания автоматизированных систем оценки таксационных показателей на основе данных дистанционного зондирования.

Распространение и особенности бореальных лесов. Бореальная лесная зона формирует широкий циркумполярный пояс Северного полушария, расположенный преимущественно между 50° и 70° северной широты. Она охватывает северные территории Евразии и Северной Америки. Пространственное распределение бореальных лесов определяется сочетанием климатических факторов, прежде всего продолжительностью вегетационного периода, температурным режимом и количеством атмосферных осадков.

В пределах бореальной зоны выделяются западный и восточный секторы, существенно различающиеся по климатическим условиям и составу растительности. Для европейской части и Западной Сибири характерны относительно мягкий климат и преобладание темнохвойных лесов, представленных елью и пихтой. В восточной Сибири, где распространены многолетние мерзлые породы и резко континентальный климат, доминируют лиственничные леса, отличающиеся высокой устойчивостью к экстремально низким температурам и дефициту влаги. В Северной Америке значительные площади занимают древостои с преобладанием елей, сосны скрученной и пихты бальзамической [8]. Видовое разнообразие древесной растительности в бореальных лесах относительно невелико по сравнению с лесами умеренного и тропического поясов, что обусловлено суровыми климатическими условиями и ограниченной продолжительностью вегетационного периода. Существенное влияние на структуру древостоев оказывают природные нарушения, включая лесные пожары, вспышки массового размножения насекомых-вредителей, ветровалы и процессы заболачивания. В результате на сравнительно небольших территориях формируются древостои различного возраста, полноты, породного состава и продуктивности [9].



Рисунок 1. Распространение бореальных лесов

Figure 1. Distribution of boreal forests

Для бореальных лесов характерна высокая пространственная неоднородность, проявляющаяся как в горизонтальной, так и в вертикальной структуре насаждений. Горизонтальная неоднородность обусловлена мозаичным распределением участков, находящимся на разных стадиях сукцессии после природных нарушений. Вертикальная структура определяется сочетанием древесного полога, подроста, кустарникового яруса и напочвенного покрова, представленного преимущественно мхами, лишайниками и кустарниками. Также характерной особенностью является значительная вариабельность морфометрических параметров древостоев даже в пределах однородных лесорастительных условий. Высота деревьев, сомкнутость крон, густота и запас древесины могут существенно изменяться в зависимости от возраста насаждений, условий местопроизрастания и истории нарушений. Дополнительные сложности при проведении лесотаксационных исследований создают широкое распространение труднодоступных территорий, наличие заболоченных участков и ограниченная транспортная инфраструктура [10].

Перечисленные особенности определяют специфику бореальных лесов как объекта дистанционных исследований. Высокая пространственная неоднородность, сложная вертикальная структура и большие площади распространения предъявляют повышенные требования к методам получения лесотаксационной информации. В отличие от традиционных наземных подходов современные технологии лазерного сканирования позволяют учитывать трехмерную организацию лесного покрова и обеспечивают возможность детального анализа пространственной структуры древостоев на различных уровнях, а именно от отдельных деревьев до крупных лесных массивов.

Экологическое и экономическое значение бореальных лесов. Бореальные леса выполняют множество экосистемных функций, имеющих важное значение как на региональном, так и на глобальном уровне. Их экологическая и экономическая ценность определяется способностью обеспечивать долговременное депонирование углерода, поддерживать биологическое разнообразие, формировать сырьевую базу лесного комплекса и оказывать влияние на устойчивость природных и социально-экономических систем.

Участие в глобальном углеродном цикле является одной из ключевых функций. Значительные объемы углерода аккумулируются не только в древесной биомассе, но и в лесной подстилке, органогенных горизонтах почв и торфяниках. В отличие от многих других лесных экосистем, основная часть углеродных запасов бореальной зоны сосредоточена именно в почвенном покрове. Низкие температуры и замедленные процессы разложения органического вещества способствуют длительному сохранению накопленного углерода. Поэтому даже незначительные изменения состояния бореальных лесов могут оказывать существенное влияние на региональный и глобальный парниковый баланс [4]. Бореальные леса также играют важную роль в поддержании биоразнообразия. Несмотря на сравнительно невысокое видовое разнообразие древесных пород, эти экосистемы обеспечивают среду обитания для большого числа видов растений, животных, грибов и микроорганизмов, многие из которых адаптированы к специфическим условиям северных широт. Особое значение имеют старовозрастные леса, валежная древесина, заболоченные участки и мозаичная структура ландшафтов, формирующая разнообразие экологических ниш. Сохранение пространственной неоднородности бореальных экосистем рассматривается как одно из ключевых условий поддержания их устойчивости и способности к естественному восстановлению после природных разрушений [9].

Экономическая значимость бореальных лесов определяется не только объемами древесных запасов, но и многообразием ресурсов, вовлеченных в хозяйственный оборот. Основными видами лесной продукции являются деловая древесина, используемая в строительстве и производстве пиломатериалов, сырье для целлюлозно-бумажной промышленности, топливная древесина, а также продукция глубокой переработки, включая древесные плиты, биотопливо, химические компоненты и материалы с высокой добавленной стоимостью. В России бореальные леса формируют основу лесопромышленного комплекса, обеспечивая значительную часть заготовки древесины и экспортных поставок лесной продукции. По данным Рослесхоза и Федеральной службы государственной статистики, вклад лесного комплекса в валовой внутренний продукт Российской Федерации оценивается в пределах 1-1,5%, при этом для ряда северных и восточных регионов страны лесная отрасль является одной из ключевых составляющих экономики, обеспечивая занятость населения и формирования доходной части региональных бюджетов. Российская Федерация занимает ведущие позиции в мире по запасам древесины, располагая около пятой части мировых лесных ресурсов, значительная доля которых сосредоточена именно в бореальной зоне [11].

Экономическая ценность климаторегулирующих функций бореальных лесов в последние годы также возрастает. Развитие механизмов углеродного регулирования и добровольных углеродных рынков повышает спрос на достоверные данные о запасах углерода и способности лесных экосистем к его депонированию. Лесные ресурсы при этом рассматриваются не только как источник древесного сырья, но и как природный актив, способный обеспечивать долгосрочные экологические и экономические выгоды.

При этом устойчивость бореальных лесов все в большей степени определяется воздействием природных и антропогенных факторов. Наиболее серьезную угрозу представляют лесные пожары, площадь которых в последние десятилетия имеет тенденцию к увеличению. Прямой экономический ущерб от пожаров включает потери древесных ресурсов, затраты на тушение и восстановление лесов, повреждение транспортной и энергетической инфраструктуры. Косвенные последствия связаны со снижением инвестиционной привлекательности лесных территорий, сокращением объемов заготовки древесины и нарушением работы предприятий лесного комплекса [12].

Деградация лесов оказывает существенное влияние и на качество жизни населения. Задымление от крупных пожаров ухудшает санитарно-гигиенические условия и повышает риски для здоровья людей, проживающих как в непосредственной близости от очагов возгорания, так и на

значительном удалении от них. Нарушение гидрологического режима лесных территорий способствует росту вероятности наводнений и эрозийных процессов, а сокращение лесного покрова приводит к снижению рекреационной ценности территории и ухудшению условий традиционного природопользования.

Масштабность возможных экологических и экономических последствий требует регулярного получения актуальной информации о состоянии бореальных лесов, динамике их изменений и последствиях природных нарушений. В связи с этим возрастает роль современных методов лесной таксации, способных обеспечить объективную оценку лесных ресурсов на больших территориях и повысить эффективность принятия управленческих решений.

Традиционные методы лесной таксации и их ограничения. Современная лесная таксация сочетает наземные измерения и выборочный статистический подход, при котором характеристики древостоев определяются по данным ограниченного числа пробных площадей с последующей экстраполяцией результатов на более крупные пространственные единицы. В качестве объектов учета рассматриваются отдельные деревья, древостои, лесотаксационные выделы, кварталы и эксплуатационные участки.

В бореальных лесах наземная инвентаризация ориентирована преимущественно на хвойные древостои, представленные сосной, елью, лиственницей и пихтой, которые формируют основу эксплуатационных запасов древесины. В зависимости от задач лесоуправления результаты таксации используются для оценки лесосырьевого потенциала, планирования рубок, прогнозирования динамики лесного фонда, расчета углеродных запасов и мониторинга природных нарушений.

Трудоемкость полевых работ определяется не только объемом измерений, но и логистическими затратами. В условиях бореальных лесов время, необходимое для обследования одной пробной площади, составляет от одного до нескольких часов в зависимости от плотности древостоя, сложности рельефа и транспортной доступности территории. При этом значительная часть ресурсов расходуется на перемещение между объектами наблюдений, организацию полевых маршрутов и последующую камеральную обработку данных.

Несмотря на стандартизированность методик и накопленный опыт их применения, наземные методы инвентаризации имеют ряд фундаментальных ограничений, которые особенно проявляются в бореальных лесах.

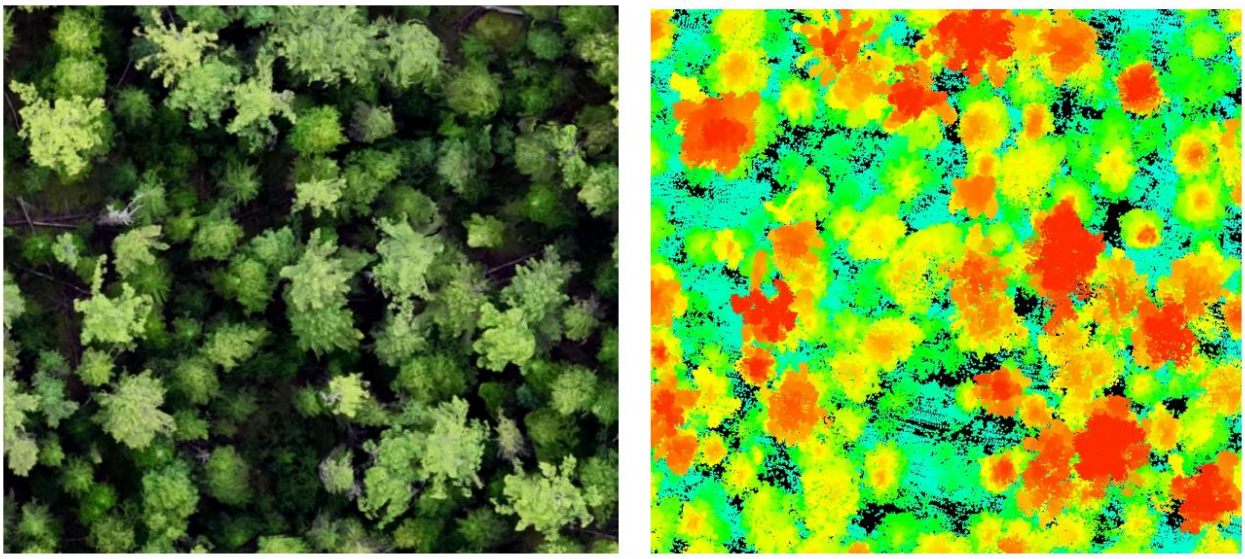
Одно из основных ограничений связано с дискретным характером выборочных наблюдений. Таксационные характеристики определяются на ограниченном количестве пробных площадей, тогда как пространственная экстраполяция результатов выполняется для выделов площадью в десятки и сотни гектаров. В условиях высокой мозаичности бореальных ландшафтов, обусловленной неоднородностью рельефа, гидрологического режима и историей природных нарушений, подобный подход неизбежно приводит к снижению точности оценок [6].

Существенным фактором неопределенности остается субъективность отдельных измерений и экспертных оценок. Наибольшая вариабельность характерна для определения качественных показателей, включая полноту, санитарное состояние, границы выделов и категорию жизнеспособности древостоев. Точность результатов зависит от квалификации исполнителей, используемого оборудования и соблюдения методических требований, что затрудняет сопоставление данных, полученных в разные периоды времени [2]. Дополнительные ограничения связаны с особенностями бореальных территорий. Значительная площадь лесов, низкая плотность транспортной сети, высокая заболоченность, сложный рельеф и сезонные ограничения существенно увеличивают стоимость полевых работ. В ряде случаев доступ к участкам возможен только с использованием специализированной техники или авиационного транспорта, что ограничивает объем собираемых данных и периодичность наблюдений.

Отдельной проблемой является несоответствие между скоростью изменения лесных экосистем и периодичностью обновления лесоустроительной информации. Интервал между последовательными циклами инвентаризации может достигать десяти и более лет, тогда как существенные изменения состояния лесного покрова, вызванные природными и неприродными явлениями, происходят в течение одного вегетационного сезона. В результате материалы лесоустройства нередко утрачивают актуальность до завершения очередного цикла наблюдений.

Традиционные методы лесной таксации обеспечивают высокую точность локальных измерений, но не позволяют оперативно получать данные о состоянии бореальных лесов на региональном уровне из-за высокой трудоемкости, дискретности наблюдений и низкой частоты обновления информации. Это определяет необходимость использования методов дистанционного зондирования, в том числе технологий лазерного сканирования, позволяющих оценивать трехмерную структуру лесного покрова.

Современные методы лазерного сканирования в лесной таксации. Воздушное лазерное сканирование (Airborne Laser Scanning, ALS) является наиболее распространенной технологией дистанционной оценки лесных ресурсов на региональном уровне. Метод основан на регистрации времени прохождения лазерного импульса между сканером, установленным на пилотируемой или беспилотной авиационной платформе, и отражающей поверхностью. Совместное использование инерциальных навигационных систем и спутникового позиционирования позволяет формировать геопривязанное трехмерное облако точек, характеризующего пространственную структуру лесного покрова.



1 2

Рисунок 2. Сравнение (1) ортофотоплана и (2) облака точек воздушного лазерного сканирования (ВЛС) для одного и того же участка леса

Figure 2. Comparison of (1) orthophoto and (2) airborne laser scanning (ALS) point cloud for the same forest area

Информационное содержание ALS-данных определяется плотностью точек, углом сканирования, длинной волны излучения, характеристиками приемника и количеством регистрируемых отражений. Современные многократные импульсные системы позволяют фиксировать несколько возвратов от одного лазерного импульса, что обеспечивает возможность одновременного описания верхней границы полога, внутренних ярусов растительности и поверхности земли [13].

Для задач лесной таксации данные ALS используются при построении цифровых моделей рельефа и поверхности, расчете высоты полога, оценке сомкнутости крон, запасов древесины, биомассы и других таксационных показателей. Основным преимуществом метода является возможность оперативного обследования крупных и труднодоступных территорий, что особенно актуально для бореальных лесов, характеризующихся низкой плотностью транспортной сети, высокой заболоченностью и сложным рельефом.

Эффективность ALS существенно зависит от параметров съемки и характеристик лесного покрова. В условиях высокой сомкнутости крон снижается вероятность прохождения лазерных импульсов к нижним ярусам растительности и поверхности земли, что приводит к неполному описанию внутренней структуры древостоя. Наибольшие ограничения связаны с оценкой параметров стволовой части насаждений, включая диаметры деревьев, форму стволов и характеристики валежника. Даже при высокой плотности точек большинство отражений регистрируется в верхней части полога, тогда как количество точек на уровне стволов зачастую оказывается недостаточным для выполнения индивидуальной таксации деревьев [14].

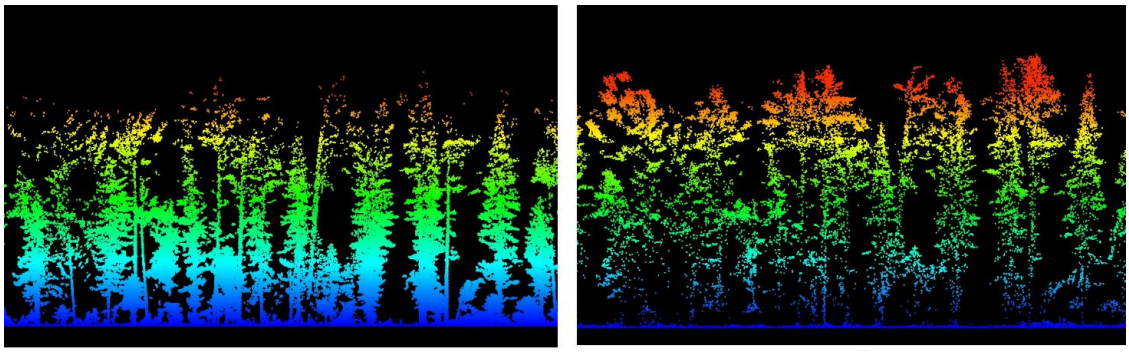


Рисунок 3. Сравнение облаков точек MLS (1) и ALS (2) для одного участка бореального леса

Figure 3. Comparison of MLS (1) and ALS (2) point clouds for the same boreal forest site

Дополнительным ограничением является компромисс между площадью покрытия и плотностью сканирования. При увеличении высоты полета и ширины полосы захвата снижается плотность точек, что ухудшает качество оценки детальных таксационных характеристик. Проведение повторных облетов или использование низковысотных платформ позволяет повысить информативность данных, однако сопровождается ростом стоимости съемки и объема последующей обработки данных.

Наземное лазерное сканирование. Наземные системы лазерного сканирования обеспечивают получение высокоплотных трехмерных данных о структуре лесного покрова и используются преимущественно для детальной оценки морфометрических характеристик древостоев. В зависимости от способа сбора данных выделяют статическое наземное лазерное сканирование (Terrestrial Laser Scanning, TLS) и мобильное лазерное сканирование (Mobile Laser Scanning, MLS).

Статическое лазерное сканирование предполагает последовательное выполнение съемки с фиксированных позиций. Для минимизации эффекта окклюзии и обеспечения полноты покрытия требуется организация сети скан-станций с последующей регистрацией отдельных облаков точек в единой системе координат. В лесных условиях данный процесс сопровождается необходимостью многократной перестановки оборудования, использованием процедур взаимного уравнивания данных.

Высокая точность TLS делает его эффективным инструментом для исследования архитектуры отдельных деревьев, построения аллометрических моделей, оценки объема стволов и изучения вертикальной структуры насаждений. Однако значительные временные затраты на полевые работы

и обработку данных ограничивают применение метода в задачах производственной лесной таксации. В настоящее время TLS используется преимущественно в научных исследованиях, а также для создания эталонных наборов данных и валидации результатов дистанционного зондирования [15].

Мобильное лазерное сканирование (MLS) основано на непрерывном сборе данных в процессе перемещения оператора или транспортной платформы. Геопривязка измерений осуществляется с использованием алгоритмов одновременной локализации и построения карты (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM), обеспечивающих реконструкцию траектории движения в условиях ограниченного спутникового сигнала. В отличие от ALS, мобильные системы формируют облака точек с высокой детализацией нижних ярусов леса. Это позволяет получать информацию о микрорельефе, напочвенном покрове, валежнике, подросте и геометрии стволов. Высокая плотность точек обеспечивает возможность автоматизированного определения диаметров деревьев, оценки формы стволов и расчета ряда таксационных показателей на уровне отдельных экземпляров.

Эффективность MLS снижается в древостоях с высокой вертикальной и горизонтальной сомкнутостью. В условиях густого полога существенно возрастает вероятность потери информации о верхней части крон и вершинах деревьев вследствие экранирования лазерных импульсов листвой и ветвями. Кроме того, точность пространственной привязки данных ограничивается накоплением ошибок SLAM-алгоритмов, величина которых увеличивается пропорционально протяженности маршрута и сложности структуры лесной среды.

На рисунке 3 представлено сравнение вертикального распределения плотности точек для двух методов наземной и воздушной съемки. В случае MLS (1) максимальная плотность точек приходится на нижнюю часть древостоя, что обеспечивает высокую точность определения диаметров стволов и характеристик подлеска, однако верхняя часть крон и вершины деревьев остаются недооописанными. В случае ALS (2) основная часть отражений регистрируется от верхней границы полога, тогда как плотность точек в придорожном и подпологовом пространстве резко снижается, что ограничивает возможность оценки стволовой части насаждений.

В настоящее время применение MLS ограничено относительно небольшими площадями съемки. На практике размер участка, обеспечивающего приемлемую точность пространственной регистрации, редко превышает 0,3 – 0,5 га без использования дополнительных методов коррекции траектории. Поэтому MLS преимущественно используют для детальной инвентаризации пробных площадей и получения эталонных данных для калибровки и валидации моделей, построенных по материалам воздушного лазерного сканирования [16].

Ограничения применения лазерного сканирования в бореальных лесах. Активное внедрение технологий лазерного сканирования в лесную таксацию не исключает ряда методологических ограничений. В последние годы наблюдается интенсивное развитие как воздушных, так и наземных платформ сканирования, совершенствуются методы обработки точек, разрабатываются алгоритмы автоматического извлечения таксационных показателей и создаются специализированные программные комплексы для анализа пространственной структуры древостоев. Современные подходы к обработке LIDAR-данных позволяют в автоматизированном режиме определять высоту деревьев, диаметры стволов, параметры крон, запас древесины и биомассу. Отдельное направление исследований связано с разработкой алгоритмов идентификации древесных пород на основе геометрических характеристик облаков точек, их интеграцией со спектральными данными и построением аллометрических зависимостей между морфометрическими параметрами древостоя [17].

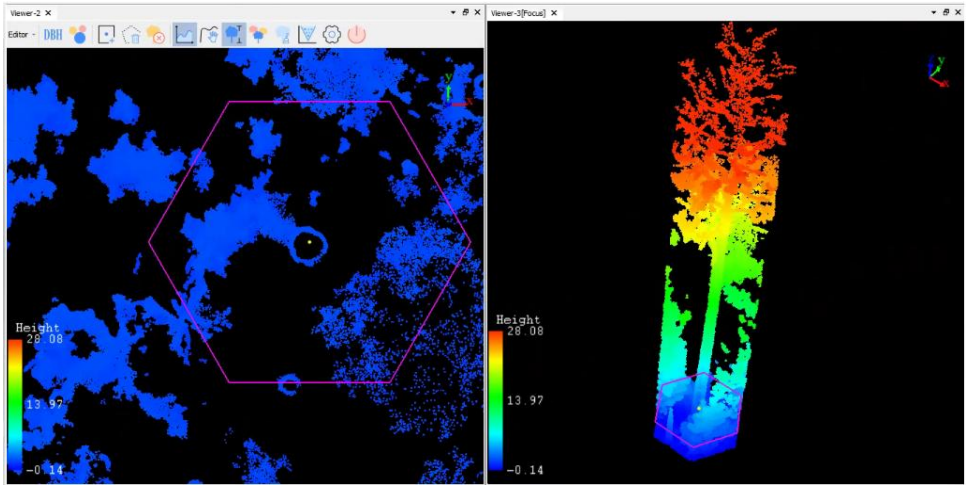


Рисунок 4. Пример определения диаметров стволов по данным MLS в программе LiDAR360

Figure 4. Example of stem diameter estimation from MLS data in LiDAR360

Развитие методов машинного обучения и компьютерного зрения существенно расширило возможности автоматической сегментации отдельных деревьев и моделирования таксационных характеристик. В настоящее время активно исследуются подходы, основанные на использовании трехмерных сверточных нейронных сетей, графовых моделей и генеративных алгоритмов, способных учитывать сложную пространственную организацию лесного покрова.

Однако ни одна из существующих платформ лазерного сканирования не обеспечивает полного набора данных, необходимого для решения всех задач лесной таксации в условиях бореальных лесов. Воздушное лазерное сканирование эффективно при обследовании больших и труднодоступных территорий, однако его возможности по описанию стволовой части древостоев остаются ограниченными. Напротив, мобильное лазерное сканирование обеспечивает высокую детализацию нижних ярусов леса и позволяет определять параметры отдельных деревьев, но характеризуется низкой производительностью и ограниченной площадью съемки [18]. Поэтому все чаще используются подходы, основанные на интеграции данных различных платформ. Комбинирование ALS и MLS позволяет использовать преимущества каждого метода: воздушное сканирование обеспечивает пространственную непрерывность и охват крупных территорий, тогда как мобильные системы используются для калибровки моделей и валидации результатов на пробных площадях. Формирование мультисенсорных наборов данных рассматривается как один из наиболее перспективных подходов к повышению точности оценки лесотаксационных показателей.

Использование комбинированных схем не устраняет ключевое ограничение существующих подходов, а именно необходимость сохранения наземного этапа работ. Для получения информации о параметрах стволовой части древостоя, построения калибровочных моделей и контроля качества данных по-прежнему требуется проведение мобильного сканирования или традиционных полевых измерений.

В условиях бореальных лесов, характеризующихся значительными площадями, низкой транспортной доступностью и высокой стоимостью полевых работ, сохранение наземного этапа существенно ограничивает возможности масштабирования технологий лазерного сканирования. Несмотря на высокую степень автоматизации обработки данных, процесс инвентаризации остается зависимым от участия специалистов непосредственно на исследуемой территории.

Современное развитие методов лазерного сканирования связано не только с повышением точности оценки отдельных таксационных показателей, но и со снижением зависимости результатов инвентаризации от наземных измерений. Одной из основных задач остается разработка методов,

позволяющих компенсировать неполноту данных воздушного лазерного сканирования и получать полный набор лесотаксационных характеристик при минимальном участии полевых бригад.

Экономическая эффективность применения лазерного сканирования. Оценка экономической эффективности применения технологий лазерного сканирования в лесной таксации требует учета не только прямых затрат на проведение съемки, но и расходов, связанных с обработкой данных, разработкой программного обеспечения, поддержанием вычислительной инфраструктуры и организацией полевых работ. В отличие от традиционной таксации, структура затрат при использовании дистанционных методов характеризуется высокой долей первоначальных инвестиций и сравнительно низкими предельными издержками при масштабировании работ.

Традиционная наземная таксация предполагает значительные затраты на организацию полевых работ, оплату труда специалистов, транспортное обеспечение, размещение персонала и камеральную обработку результатов. В условиях бореальных лесов логистические расходы могут составлять существенную часть общей стоимости инвентаризации. По экспертным оценкам, стоимость наземной таксации в отдельных регионах Сибири составляет порядка 7-10 тыс. рублей за гектар, при этом детальное обследование пробных площадей требует дополнительных затрат и существенно увеличивает продолжительность работ.

Экономика воздушного лазерного сканирования имеет иной характер. На начальном этапе внедрения значительная часть затрат связана с приобретением или арендой оборудования, выполнением летных работ, созданием специализированного программного обеспечения и разработкой алгоритмов автоматической обработки облаков точек. В результате текущая стоимость комплексных работ, включающих съемку, обработку данных и построение таксационных моделей, может превышать затраты на традиционную инвентаризацию и достигать 20 тыс. руб. за гектар.

Существенная доля указанных затрат носит фиксированный характер и не зависит от площади обследуемой территории. По мере накопления обучающих выборок, совершенствования алгоритмов автоматической обработки и тиражирования разработанных решений удельная стоимость дистанционной таксации снижается. Наиболее значимый экономический эффект достигается при обследовании крупных лесных массивов, где затраты на разработку программных инструментов и калибровку моделей распределяются на значительные площади. Дополнительным фактором снижения затрат является стремительное развитие рынка беспилотных авиационных систем и лазерных сканеров. За последние годы наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению стоимости оборудования, повышению его производительности и расширению доступности специализированных программных решений. Одновременно сокращается объем ручной обработки данных за счет внедрения методов машинного обучения и автоматизации процессов извлечения таксационных показателей.

В долгосрочной перспективе экономическая эффективность лазерного сканирования определяется не столько снижением стоимости съемки, сколько возможностью минимизировать объем наземных работ. Сохранение мобильного лазерного сканирования и традиционных полевых измерений исключительно для создания и актуализации калибровочных выборок позволяет существенно сократить численность полевых бригад, уменьшить логистические издержки и повысить безопасность выполнения работ в труднодоступных районах.

Кроме прямого снижения затрат, применение технологий лазерного сканирования обеспечивает ряд косвенных экономических эффектов, связанных с повышением оперативности обновления лесоустроительной информации, сокращением неопределенности при оценке запасов древесины и улучшением качества управленческих решений. Регулярное получение актуальных данных о состоянии лесного фонда позволяет своевременно выявлять последствия пожаров и других

природных нарушений, оптимизировать планирование лесохозяйственных мероприятий и снижать риски, связанные с использованием устаревшей информации.

Несмотря на относительно высокие изначальные затраты, развитие технологий лазерного сканирования и автоматизированной обработки данных создает предпосылки для постепенного снижения стоимости дистанционной таксации. В условиях бореальных лесов, где традиционные методы инвентаризации характеризуются высокой трудоемкостью и значительными логистическими издержками, переход к преимущественно дистанционным подходам представляется одним из ключевых направлений повышения эффективности лесоустроительных работ.

Заключение. Бореальные леса являются важнейшим объектом лесотаксационных исследований благодаря их значительной роли в глобальном углеродном цикле, сохранении биоразнообразия и обеспечении сырьевой базы лесного комплекса. Масштабность бореальной зоны, высокая пространственная неоднородность древостоев, сложные природно-климатические условия и ограниченная транспортная доступность существенно затрудняют проведение традиционной наземной инвентаризации и предъявляют повышенные требования к современным методам мониторинга лесных ресурсов.

Проведенный анализ показал, что технологии лазерного сканирования обладают значительным потенциалом для повышения эффективности лесной таксации. Воздушное лазерное сканирование обеспечивает возможность оперативного обследования крупных и труднодоступных территорий, позволяя получать пространственно непрерывные данные о структуре лесного покрова, высоте древостоев, запасах древесины и биомассе. Мобильное лазерное сканирование, в свою очередь, обеспечивает детальное описание нижних ярусов леса и параметров стволовой части деревьев, что делает его эффективным инструментом для оценки индивидуальных таксационных характеристик.

Ни один из существующих методов лазерного сканирования не обеспечивает полного набора лесотаксационных показателей при автономном использовании. Ограничения, связанные с неполнотой данных воздушного сканирования и локальным характером мобильных измерений, обуславливают необходимость интеграции различных платформ и сохранения наземного этапа работ для калибровки и валидации результатов. Несмотря на относительно высокие начальные затраты, применение технологий лазерного сканирования характеризуется существенным потенциалом повышения экономической эффективности лесотаксационных работ за счет сокращения объема полевых измерений, повышения оперативности обновления данных и снижения логистических издержек. По мере развития беспилотных авиационных систем, снижения стоимости обработки данных ожидается дальнейшее уменьшение удельной стоимости дистанционной таксации.

Перспективы развития технологий лазерного сканирования связаны с формированием мультисенсорных наборов данных, внедрением методов машинного обучения и разработкой подходов, направленных на компенсацию неполноты дистанционных измерений. Ключевой задачей дальнейших исследований является снижение зависимости результатов инвентаризации от наземных работ и переход к преимущественно дистанционным технологиям оценки лесных ресурсов. Решение данной задачи позволит повысить эффективность мониторинга бореальных лесов, обеспечить своевременную актуализацию лесоустроительной информации и создать предпосылки для формирования цифровых двойников лесных экосистем.

Список использованных источников

1. Готье С. Бореальные леса и глобальные изменения / С. Готье, П. Бернье, Т. Куулувайнен, А. Швиденко, Д. Щепащенко // Устойчивое лесопользование. – 2016. – № 2(46). – С. 2-7.

2. Алексеев А.С. Лесная таксация и лесоустройство: учебник для вузов / под общ. ред. А.С. Алексеева. – М.: Лесная промышленность, 2019. – 512 с.
3. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. P.R. Shukla [et al.]. – Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. – DOI 10.1017/9781009157926.
4. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. V. Masson-Delmotte [et al.]. – Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. – DOI 10.1017/9781009157896.
5. Walker X.J. Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forests / X.J. Walker, J.L. Baltzer, S.G. Cumming [et al.] // Nature. – 2019. – Vol. 572. – P. 520-523. – DOI 10.1038/s41586-019-1474-y.
6. Славский В.А. Некоторые аспекты закладки пробных площадей при проведении государственной инвентаризации лесов / В.А. Славский, С.М. Матвеев // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 1 (41). – С. 56-63. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/5.
7. Szász B. Comparison of Advanced Terrestrial and Aerial Remote Sensing Methods for Above-Ground Carbon Stock Estimation—A Comparative Case Study for a Hungarian Temperate Forest / B. Szász, B. Heil, G. Kovács, D. Mészáros, K. Czimber // Remote Sensing. – 2025. – Vol. 17, No. 13. – P. 2173. – DOI 10.3390/rs17132173.
8. Тайга (хвойные леса) // Большая советская энциклопедия: в 30 т. / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1976. – Т. 25. – С. 178-180.
9. Крышень А.М. Некоторые аспекты динамики лесной растительности европейского севера России / А.М. Крышень, Н.В. Геникова // Растительность России. – 2025. – № 52. – С. 21-37. – DOI 10.31111/vegrus/2025.52.21.
10. Усольцев В.А. Морфология кроны лесообразующих родов Евразии: аллометрия и ранжирование / В.А. Усольцев, И.С. Цепордей // Хвойные бореальной зоны. – 2023. – Т. 41, № 6. – С. 504-514.
11. Открытые данные Федерального агентства лесного хозяйства [Электронный ресурс] // Официальный сайт Рослесхоза. – Режим доступа: https://rosleshoz.gov.ru/opendata/ (дата обращения: 01.06.2026).
12. Барталев С.А. Оценка гибели бореальных лесов от пожаров в XXI веке по данным о интенсивности горения / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 6. – С. 438-447. – DOI 10.21046/2070-7401-2025-22-6-438-447.
13. Hyyppä J. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests / J. Hyyppä, H. Hyyppä, D. Leckie, F. Gougeon, X. Yu, M. Maltamo // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – Vol. 29, No. 5. – P. 1339-1366. – DOI 10.1080/01431160701736489.
14. Schraik D. Questioning voxel grids: Semi-continuous sampling of leaf area density using airborne waveform lidar in boreal and hemiboreal conifer and broadleaved forests / D. Schraik, A. Hovi, M. Rautiainen // Agricultural and Forest Meteorology. – 2024. – Vol. 358. – Article 110218. – DOI 10.1016/j.agrformet.2024.110218.
15. Liang X. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories / X. Liang, J. Hyyppä, H. Kaartinen, M. Lehtomäki, J. Pyörälä, N. Pfeifer, M. Holopainen, G. Brolly, P. Francesco, J. Hackenberg, H. Huang, H.W. Jo, M. Katoh, L. Liu, M. Mokroš, J. Morel, K. Olofsson, J. Poveda-Lopez, J. Trochta, D. Wang, Y. Wang, Z. Xi, B. Yang, G. Zheng, V. Kankare, V. Luoma, X. Yu, R. Chen, M.

Vastaranta, N. Saarinen, Y. Wang // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 144. – P. 137-179. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021.

16. Wu Y. Application of SLAM-Based Mobile Laser Scanning in Forest Inventory: Methods, Progress, Challenges, and Perspectives / Y. Wu, S. Zhong, Y. Ma, Y. Zhang, M. Liu // Forests. – 2025. – Vol. 16, No. 6. – P. 920. – DOI 10.3390/f16060920.

17. Donager J.J. Adjudicating perspectives on forest structure: How do airborne, terrestrial, and mobile lidar-derived estimates compare? / J.J. Donager, A.J. Sánchez Meador, R.C. Blackburn // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 12. – Article 2297.

18. Kulicki M. Artificial Intelligence and Terrestrial Point Clouds for Forest Monitoring / M. Kulicki, C. Carlos, T. Trzciński, J. Będkowski, K. Stereńczak // Current Forestry Reports. – 2025. – Vol. 11. – Article 5. – DOI 10.1007/s40725-024-00234-4.

References

1. Gotye S. Boreal forests and global change / S. Gotye, P. Bernier, T. Kuuluvainen, A. Shvidenko, D. Shchepashchenko // Sustainable forest management. – 2016. – No. 2(46). – P. 2-7.

2. Alekseev A.S. Forest inventory and forest management: textbook for universities / ed. by A.S. Alekseev. – Moscow: Lesnaya promyshlennost, 2019. – 512 p.

3. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. P.R. Shukla [et al.]. – Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. – DOI 10.1017/9781009157926.

4. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. V. Masson-Delmotte [et al.]. – Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. – DOI 10.1017/9781009157896.

5. Walker X.J. Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forests / X.J. Walker, J.L. Baltzer, S.G. Cumming [et al.] // Nature. – 2019. – Vol. 572. – P. 520-523. – DOI 10.1038/s41586-019-1474-y.

6. Slavskiy V.A. Some aspects of establishing sample plots during the state forest inventory / V.A. Slavskiy, S.M. Matveev // Forestry Engineering Journal. – 2021. – Vol. 11, No. 1 (41). – P. 56-63. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/5.

7. Szász B. Comparison of Advanced Terrestrial and Aerial Remote Sensing Methods for Above-Ground Carbon Stock Estimation—A Comparative Case Study for a Hungarian Temperate Forest / B. Szász, B. Heil, G. Kovács, D. Mészáros, K. Czimber // Remote Sensing. – 2025. – Vol. 17, No. 13. – P. 2173. – DOI 10.3390/rs17132173.

8. Taiga (coniferous forests) // Great Soviet Encyclopedia : in 30 vols. / ed. by A.M. Prokhorov. – 3rd ed. – Moscow: Sovetskaya enciklopediya, 1976. – Vol. 25. – P. 178-180.

9. Kryshen A.M. Some aspects of forest vegetation dynamics in the European North of Russia / A.M. Kryshen, N.V. Genikova // Vegetation of Russia. – 2025. – No. 52. – P. 21-37. – DOI 10.31111/vegrus/2025.52.21.

10. Usoltsev V.A. Crown morphology of forest-forming genera of Eurasia: allometry and ranking / V.A. Usoltsev, I.S. Tsepordey // Conifers of the boreal zone. – 2023. – Vol. 41, No. 6. – P. 504-514.

11. Open data of the Federal Forestry Agency [Electronic resource] // Official website of Rosleskhoz. – Access mode: https://rosleshoz.gov.ru/opendata/ (accessed: 01.06.2026).

12. Bartalev S.A. Assessment of boreal forest mortality from fires in the 21st century based on fire intensity data / S.A. Bartalev, V.A. Egorov, V.O. Zharko [et al.] // Current problems of remote sensing of the Earth from space. – 2025. – Vol. 22, No. 6. – P. 438-447. – DOI 10.21046/2070-7401-2025-22-6-438-447.

13. Hyyppä J. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests / J. Hyyppä, H. Hyyppä, D. Leckie, F. Gougeon, X. Yu, M. Maltamo // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – Vol. 29, No. 5. – P. 1339-1366. – DOI 10.1080/01431160701736489.
14. Schraik D. Questioning voxel grids: Semi-continuous sampling of leaf area density using airborne waveform lidar in boreal and hemiboreal conifer and broadleaved forests / D. Schraik, A. Hovi, M. Rautiainen // Agricultural and Forest Meteorology. – 2024. – Vol. 358. – Article 110218. – DOI 10.1016/j.agrformet.2024.110218.
15. Liang X. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories / X. Liang, J. Hyyppä, H. Kaartinen, M. Lehtomäki, J. Pyörälä, N. Pfeifer, M. Holopainen, G. Brolly, P. Francesco, J. Hackenberg, H. Huang, H.W. Jo, M. Katoh, L. Liu, M. Mokroš, J. Morel, K. Olofsson, J. Poveda-Lopez, J. Trochta, D. Wang, Y. Wang, Z. Xi, B. Yang, G. Zheng, V. Kankare, V. Luoma, X. Yu, R. Chen, M. Vastaranta, N. Saarinen, Y. Wang // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 144. – P. 137-179. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021.
16. Wu Y. Application of SLAM-Based Mobile Laser Scanning in Forest Inventory: Methods, Progress, Challenges, and Perspectives / Y. Wu, S. Zhong, Y. Ma, Y. Zhang, M. Liu // Forests. – 2025. – Vol. 16, No. 6. – P. 920. – DOI 10.3390/f16060920.
17. Donager J.J. Adjudicating perspectives on forest structure: How do airborne, terrestrial, and mobile lidar-derived estimates compare? / J.J. Donager, A.J. Sánchez Meador, R.C. Blackburn // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 12. – Article 2297.
18. Kulicki M. Artificial Intelligence and Terrestrial Point Clouds for Forest Monitoring / M. Kulicki, C. Carlos, T. Trzciński, J. Będkowski, K. Stereńczak // Current Forestry Reports. – 2025. – Vol. 11. – Article 5. – DOI 10.1007/s40725-024-00234-4.

MODERN LASER SCANNING METHODS IN BOREAL FOREST INVENTORY: CAPABILITIES, LIMITATIONS, AND ECONOMIC EFFICIENCY

Ester Maria V.
Limited Liability Company "Center for Space Technologies and Services"
14 Lavrova St., Perm, 614038, Russia
E-mail: ester.maria17@mail.ru

© Эстер М.В., 2026

УДК 656.02

[1]Беляев А.К., [1]Биденко С.И., [2]Звездарёв Д.В., [3]Калганов В.А., [4]Сердитова Н.Е.

ГЕОКОНТРОЛЛИНГ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ АКТИВНОСТИ: МАШИННО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ АКТОРНОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ ЗОНЫ

[1]Беляев Александр Константинович
эксперт-аналитик
АО «Сигнал-И»
Санкт-Петербург
E-mail: alexbel3101@yandex.ru

[1]Биденко Сергей Иванович
доктор технических наук, профессор
старший эксперт-аналитик
АО «Сигнал-И»
Санкт-Петербург
E-mail: sibidenko@mail.ru

[2]Звездарёв Дмитрий Валентинович
кандидат технических наук
заместитель генерального директора
Акционерное общество «Научно-исследовательский институт автоматической аппаратуры имени академика В. С. Семенихина» (АО «НИИАА»)
Москва
E-mail: dzvezdarev@mail.ru

[3]Калганов Виктор Александрович
кандидат технических наук, доцент
первый заместитель начальника
Национальный центр управления обороной РФ
Москва
E-mail: ncuorf@mil.ru

[4]Сердитова Наталья Евгеньевна
доктор географических наук, профессор
проректор
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)»
Москва
E-mail: serditovane@miigaik.ru

Аннотация. *Отмечен глобальный пространственно-географический охват и сложное предметное содержание территориальной хозяйственной активности (ТХА). Указана необходимость использования территориальных приложений для регулирования ТХА. Предложено использование аппарата геоконтроллинга для регулирования ТХА. Установлено, что для эффективного применения геоконтроллингового метода перспективным и целесообразным является использование аппарата семантического описания – онтологий. Определены классы, связи, роли, аксиомы контроллинговой онтологии, выявлено, что для онтологической поддержки*

геоконтроллинга требуется переход к геоонтологии. Для реализации онтологического подхода разработано формализованное описание сущностей, их атрибутов и пространственно-содержательных отношений с использованием редактора Protégé и технологий OWL 2, RDF. Представлена реализация пространственных запросов для извлечения данных об объектах, операционных зонах, ресурсных состояниях, факторах обстановки и операционных рисках средствами SPARQL / GeoSPARQL. Сформулированы правила логического вывода SWRL для выработки пространственно-содержательных управленческих рекомендаций по обеспечению операционной способности ТХА, в которых решение формируется по последовательности «геообъект – операционная зона – ресурсное состояние – фактор – событие – оценка риска – управленческая альтернатива».

Ключевые слова: *геоконтроллинг, территориальная хозяйственная активность, геомодель, онтология, геоонтология, операционная зона, GeoSPARQL, формально-логический вывод*

GEOCONTROLLING OF TERRITORIAL ECONOMIC ACTIVITY: A MACHINE-ORIENTED ONTOLOGICAL APPROACH TO MODELING AN ACTOR-BASED OPERATIONAL ZONE

Annotation. *The global spatial and geographical scope and the complex subject-matter structure of territorial economic activity (TEA) are noted. The need to use territorial applications for regulating TEA is identified. The use of geocontrolling tools for regulating TEA is proposed. It is established that, for the effective application of the geocontrolling method, the use of semantic description tools—ontologies—is a promising and appropriate approach. The classes, relations, roles, and axioms of the controlling ontology are defined, and it is shown that ontological support of geocontrolling requires a transition to a geo-ontology. To implement the ontological approach, a formalized description of entities, their attributes, and spatial-content relations has been developed using the Protégé ontology editor and OWL 2 and RDF technologies. The implementation of spatial queries for retrieving data on objects, operational zones, resource states, environmental factors, and operational risks using SPARQL / GeoSPARQL is presented. SWRL inference rules are formulated for generating spatial-content management recommendations aimed at ensuring the operational capability of TEA, in which the decision is formed according to the sequence "geo-object — operational zone — resource state — factor — event — risk assessment — management alternative."*

Keywords: *geocontrolling, territorial economic activity, geomodel, ontology, geo-ontology, operational zone, GeoSPARQL, formal logical inference.*

Введение. Территориальная хозяйственная активность (ТХА) отличается глобальным пространственным охватом (регион, область, федеральный округ, агломерация, море, воздушное пространство Земли, ближний космос) и сложным содержательным функционированием (энергетика, транспорт, промышленность, сельское хозяйство, изыскания, добыча полезных ископаемых, углеводородов, биоресурсов).

ТХА или операционная деятельность (ОД) - это расположение, распределение, функционирование территориальных объектов, инфраструктуры, обеспечивающих организаций, расположенных на (или около) поверхности Земли (ПЗ), воздушном пространстве, ближнем космосе.

ТХА в определенной территории (операционный район) образует особый пространственно-временной континуум – пространство хозяйственной деятельности, детерминирующий расположение и действия в определенном географическом районе или территории объектов и

субъектов народного хозяйства и его инфраструктуры. Традиционным средством поддержки управления любой территориальной активностью (в т. ч. и хозяйственной деятельностью) является аппарат геоконтроллинга.

Описание и формализация геопространственных систем и процессов является предметом исследования многих территориальных приложений, таких как классическое географическое описание, геомаркетинг, ландшафтный дизайн, моделирование поверхностей, послойное представление, векторное (объектно-ориентированное) моделирование и др. Все они ориентированы на первичное структурирование и концептуальное описание пространственной предметной области. То есть они дают обобщенное схематичное представление геообъектов, территориальных процессов, их связей и отношений. Они приемлемо эффективны для своих конкретных процессных приложений. При каких-либо изменениях в исследуемой ими предметной области, для их применения необходимо выполнять трудоемкое перепроектирование, переформирование, перенастройка системы описания и формализации рассматриваемых объектов и связей.

При необходимости доведения результатов первичной формализации до программных реализаций, желательна такая имплементация, которая не вызывала бы надобность полной перенастройки системы описания исследуемой предметной области (ПО). К таким методам можно отнести аппарат семантического описания, т. е. онтологии.

При решении задач управления территориальными объектами и процессами в системе ТХА (геоконтроллинг) сложность перенастройки описания предметной области (ПО) традиционными территориальными дисциплинами увеличивается на порядок. Поэтому применение аппарата онтологий в геоконтроллинговом моделировании является целесообразным и перспективным.

Управление территориально распределёнными объектами и процессами требует оперирования большими объемами разнородных геоданных. В одном контуре должны учитываться координаты и границы объектов, свойства территориальных зон, состояние технических средств, события, факторы среды, маршруты доступа, ограничения обслуживания и возможные управленческие действия. Эти данные имеют пространственную привязку, разные источники поступления, полноту, достоверность и актуальность. Поэтому поддержка управления такими объектами не может опираться на локальные сведения об отдельных элементах. Требуется представление обстановки как системы пространственно локализованных и содержательно связанных сущностей.

Структура множества специальных моделей и методов геоконтроллинга ТТА. Территориальное управление (ТУ) или геоинформационная поддержка управления (ГИУ) – это регулирование в геопространстве действий территориальных объектов (ТО) и систем (геосистем) для решения тех или иных задач, имеющих пространственное выражение (интерпретацию).

Методы ГИУ в своей завершенной форме представляют систему геоконтроллинга территорией. Следует отметить, что геоконтроллинг это не самостоятельная управленческая категория, а это модельно-методический аппарат АСУ, связанных с управлением геообъектами, территориальными процессами и геосистемами. Т. е. АСУ с элементами пространственного анализа. Геоконтроллинг существует не отдельно, сам по себе, а функционирует в технико-информационно-программной среде АСУ, пользуется ее подсистемами связи (телекоммуникации), освещения обстановки, сбора и отображения информации.

Геоконтроллинг ТХА - это компонент АСУ, включающий систему моделей, методов и процедур представления, обработки и анализа пространственной информации, направленных на поддержку задач регулирования территориальной хозяйственной деятельности (рис. 1).

Геоинформационная поддержка регулирования (управления) ТХА (геоконтроллинг) заключается в территориальной интерпретации и выполнении классических этапов методики управления подчиненными объектами («силами») на единой геопространственной основе. Т. е. ГИУ или геоконтроллинг привязан к канонической схеме управления «штабом» (субъект управления) какими-либо подчиненными (управляемыми) объектами.



Рисунок 1. Состав системы геоконтроллинга (геоинформационной поддержки управления): АСУ – автоматизированная система управления; ТХА - территориальная хозяйственная активность

Figure 1. Structure of the geocontrolling system (geoinformation support for management): ACS – automated control system; TEA – territorial economic activity

Сюда входят следующие этапы управления (рис. 2): уяснение задачи (выявление (установление) рассогласования (невязки) плана с ходом его исполнения; идентификация ситуации «опасность» (нештатная ситуация); наступление очередного этапа циклического функционирования ТО); оценка обстановки; выработка решения (вариантов действий); планирование; организация выполнения плана (реализации решения).



Рисунок 2. Последовательность основных этапов управления территориальными и др. объектами и системами

Figure 2. Sequence of the main stages of managing territorial and other objects and systems

Необходимым условием реализуемости геоконтроллинга является требование киберспособности операционной зоны ТХА. Это объясняется тем, что киберфизическая составляющая системы территориального управления в значительной мере детерминирует пространственный охват и качество ее функционирования в целом.

Достаточное условие геоконтроллинга – операционная способность зоны ТХА – непустое пересечение пространств киберфизической, ресурсной, процессно-ситуационной способности. Зона операционной способности (операционная зона) – это географический район, в котором управляемый объект (наряд, группа, транспортное средство, экспедиция) может функционировать по ресурсным параметрам (запасы топлива, продовольствия, human-фактор, требуемый ресурс механизмов и оборудования) и процессно-ситуационным требованиям (метео, ветер, температура, осадки, видимость, топогеодезическое – навигационное – координатно-временное обеспечение, ситуационно-контроллинговые, тактические ограничения). Т. е. – это пересечение ресурсного и процессно-ситуационного подпространств (зон).

Таким образом, адекватное геомоделирование зоны киберфизической и операционной способности (в свою очередь их пересечение образует зону функциональной способности какого-либо территориального актора - геообъекта) является важной составляющей формирования системы геоконтроллинга ТХА. Имея непустую зону функциональной способности (пересечение киберфизической и операционной зон) способности определенных региональных акторов ТХА можно переходить к выработке геоконтроллинговых пространственно-содержательных рекомендаций по регулированию их территориальной деятельности.

Геоконтроллинг как контур перехода от геоситуации к пространственно-содержательному решению. Геоинформационная поддержка управления территорией (или геоконтроллинг) базируется как на системе общих моделей геоструктур (гообъекты и геосистемы) и методов создания, представления и использования ГИ, так и на специальных геоинформационных моделях и методах поддержки этапов и процедур управления конкретными территориальными объектами и системами.

Общие методы обработки геоинформации применяются на всех этапах управления и включают ввод, согласование, хранение, преобразование, отображение и анализ геоданных. Частные геоинформационные методы обеспечивают оценку обстановки, выработку рекомендаций, планирование и реализацию решений.

Переход от геоситуации к решению реализуется на трёх уровнях формализации: модель представляет обстановку; методика обеспечивает её оценку, прогноз и интерпретацию; программная методика алгоритмизирует расчёт, фиксирует результат в базе данных, отображает его на карте и формирует предписание (рис. 3).

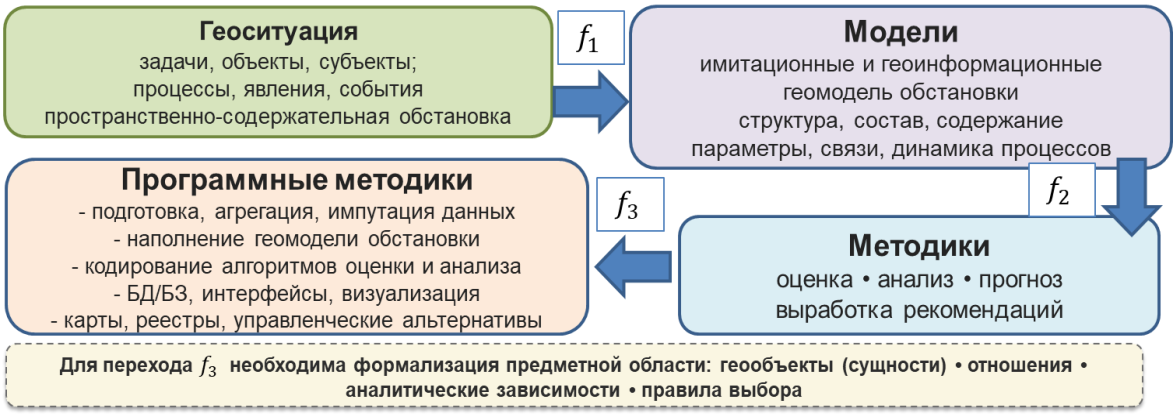


Рисунок 3. Переход от геоситуации к программной методике выработки пространственно-содержательного решения в структуре геоконтроллинга: f_1 – отображение геоситуации в модель обстановки в операционном районе; f_2 – отображение модели обстановки в оценку геоситуации; f_3 – отображение оценки обстановки в операционном районе в множество пространственно-содержательных рекомендаций ОД

Figure 3. Transition from a geosituation to a software methodology for generating a spatial-content decision within the geocontrolling structure: f_1 – mapping of the geosituation into an operational-area situation model; f_2 – mapping of the situation model into a geosituation assessment; f_3 – mapping of the operational-area situation assessment into a set of spatial-content recommendations for operational activity

Геомодель обстановки предназначена для формализованного представления предметной области, обеспечивающего совместный анализ пространственных, эксплуатационных и событийных данных. Моделирование направление на обеспечение следующих функций: выделение геообъектов и отношений упорядоченности над ними; описание признаков, состояний, событий, факторов и ограничений, используемых при оценке обстановки; включение аналитических зависимостей, по которым параметры территории и технического состояния преобразуются в риск, приоритет контроля и управленческий императив.

Описание геомодели основывается на трёх взаимосвязанных формализмах: структуре, составе и содержании. Такое представление позволяет последовательно перейти от концептуального представления предметной области к её вычислительной реализации.

Геомодель задаёт концептуальное представление обстановки, но для машинного вывода требуется её семантическая формализация. На программном уровне модели и методики преобразуются в процедуру формирования управленческих альтернатив для территориально распределённой системы, функционирующей при изменчивой обстановке и неоднородных потоках пространственных, атрибутивных, событийных и ресурсных данных.

Программная методика реализует сквозную цепочку: получение, импутацию и нормализацию данных, наполнение геомодели, оценку операционной способности, прогноз рисков, формирование альтернатив и картографическое представление результата.

Геомодель как онтология. Концептуального описания геомодели недостаточно для реализации интеллектуальной обработки данных, поскольку геомодель не определяет способ машинной интерпретации знаний и выполнения логического вывода.

В инженерии знаний данная задача решается средствами онтологического моделирования. Онтология формально задаёт классы, свойства, отношения и ограничения предметной области, обеспечивая машинную интерпретацию и логический вывод. В отличие от реляционной модели, она описывает не только структуру данных, но и семантику связей между сущностями. Базовая структура онтологического описания показана в центральной, серой части рис. 4.



Рисунок 4. Схема учета пространственно-временных особенностей геоситуации: центральная (серая) – базовая структура онтологического описания; периферийная часть (голубая) – территориально-пространственная интерпретация семантического описания обстановки; ГП – геопространство; отношения: Rel 1 – hasProperty (обладает свойством); Rel 2 – Instantiates (является представителем); Rel 3 – constrainedBy (ограничен условием); OWL 2 – ontology web language (язык описания онтологий); RDF(S) – resource description framework (язык описания веб-ресурсов онтологии); RDFS – надстройка над моделью RDF для описания классов, свойств, иерархии; SWRL – semantic web rule language (язык правил логического вывода семантической сети)

Figure 4. Scheme for accounting for the spatiotemporal features of a geosituation: central part (gray) – basic structure of the ontological description; peripheral part (blue) – territorial-spatial interpretation of the semantic description of the situation; GS – geospace; relations: Rel 1 – hasProperty (has a property); Rel 2 – Instantiates (is an instance of); Rel 3 – constrainedBy (is constrained by a condition); OWL 2 – Web Ontology Language; RDF(S) – Resource Description Framework; RDFS – an extension of the RDF model for describing classes, properties, and hierarchies; SWRL – Semantic Web Rule Language

Особенностью рассматриваемой задачи является геоспецифика ПО территориальной деятельности. Пространственные отношения являются частью предметной области и непосредственно участвуют в формировании оценки состояния и выборе управляющих воздействий. Следовательно, они должны быть представлены в той же семантической модели, что и эксплуатационные данные.

Геоонтология как территориально-содержательная интерпретация семантического описания. Для учёта пространственно-временных особенностей геоситуации применяется аппарат геоонтологий (рис. 5, периферийная часть). Он расширяет классическую онтологию сущностями пространственной локализации, факторами природной, техногенной и социальной геосреды, а также пространственными, содержательными и оценочными отношениями. Классы, индивиды, свойства и ограничения получают явную пространственную компоненту, а геометрии и топологические связи включаются в граф знаний. Формальная реализация может основываться на RDF/OWL 2, GeoSPARQL и SSN/SOSA.

Геоонтология на концептуальном уровне объединет содержательные сущности — объекты, процессы, события, состояния, факторы и действия — и территориально-географические сущности, задающие положение, геометрию, принадлежность, зоны действия, доступность и динамику.

Пространственные отношения включают вложенность, пересечение, соседство, смежность, расстояние, связность и направленность.

Принципиальное отличие подхода состоит в том, что геоонтология рассматривается не как самостоятельная модель предметной области, а как семантическая реализация геомодели обстановки. Объектам геомодели соответствуют сущности онтологии, пространственным и содержательным отношениям – объектные свойства, результатам оценки операционной способности и риска – отдельные сущности графа знаний. Это сохраняет единую логику представления данных на всех этапах методики.

На основе выделенных классов, свойств и отношений сформирована структура геоонтологии предметной области. Она дополняет геомодель формализованным описанием сущностей, их пространственных и семантических связей, а также ограничений для машинной обработки и логического вывода. Такая структура обеспечивает интеграцию с ГИС, применение правил вывода и формирование пространственно-содержательных управленческих рекомендаций.

Геоонтология включает пространственные типы данных, геометрии, топологические и метрические отношения, временные характеристики и процедуры пространственного запроса. Термины задаются средствами OWL 2, факты – в RDF, пространственные отношения и запросы – средствами GeoSPARQL и SPARQL, правила вывода – SWRL. Для разработки структуры классов и свойств используется редактор онтологий Protégé; GraphDB и PostGIS могут применяться как пространственные хранилища. Логическая классификация выполняется средствами онтологического или правилового вывода, а метрические и топологические условия проверяются пространственным хранилищем или GeoSPARQL-запросами.

Машина логического вывода использует геоонтологию в два этапа. Сначала геоситуация преобразуется в граф взаимосвязанных сущностей; затем на основе правил и ограничений формируются оценки ресурсной способности, процессно-ситуационной допустимости, киберспособности и операционного риска. Оценка представляется самостоятельной сущностью, связанной с объектом, задачей, зоной и факторами обстановки.

Применимость структуры рассматривается на примере геоконтроллинга ТХА, где общие классы и отношения конкретизируются для оценки операционной способности и формирования пространственно-содержательных управленческих альтернатив.

Система онтологий ГИУ в аспекте киберспособности операционной зоны ТХА. Геоонтологическое представление предметной области строится как согласованная система:

$$Ont_{TXA} = \langle Ont_{OP}, R_B, A_B \rangle, \quad (1)$$

где Ont_{OP} – предметный модуль операционной способности геоконтроллинга ТХА; R_B – множество межмодульных отношений; A_B – множество связующих аксиом языка Description Logic (OWL 2), определяющих обязательные семантические связи между классами онтологии.

К основным отношениям R_B относятся $occursIn$ («территориальная хозяйсвтенная активность осуществляется в операционной зоне»), $participatesIn$ («объект или субъект контроллинга участвует в процессе ТХА»), $observedBy$ («операционная зона наблюдается системой освещения и отображения обстановки»), $controlledThrough$ («объект ТХА контролируется через подсистему связи и телекоммуникаций»), $coordinatedBy$ («объект или процесс обеспечивается средствами координатно-временного обеспечения»), $supports$ («киберфизическая подсистема обеспечивает выполнение геоконтроллинговой процедуры»), $locatedIn$ («геообъект локализован в операционном районе»).

Операционная зона – пространственно-временная область, в пределах которой на текущую обстановку проецируется операционная задача и оценивается возможность её выполнения управляемым объектом территориальной хозяйственной активности:

$$Z_{op}(Q,t) = Z_{res}(Q,t) \cap Z_{ps}(Q,t) \cap Z_{cyber}(Q,t). \quad (2)$$

где: $Z_{op}(Q,t)$ – зона операционной способности для задачи Q в момент или интервал времени t; $Z_{res}(Q,t)$ – пространство ресурсной способности; $Z_{ps}(Q,t)$ – пространство процессно-ситуационной допустимости; $Z_{cyber}(Q,t)$ – пространство киберфизической способности.

Пространство ресурсной способности включает участки, достижимые объектом при имеющихся запасах топлива, остаточном техническом ресурсе, доступности инфраструктуры и готовности обеспечивающих сил. Пространство процессно-ситуационной допустимости охватывает районы, где природные, географические, навигационные, техногенные и социальные условия не препятствуют выполнению задачи.

Обобщённая структура онтологии отражает три взаимосвязанных уровня: территориальную хозяйсвтенную активность, процедуры геоконтроллинга и условия формирования операционной способности. Их согласование выполняется через операционную зону, объекты и субъекты ТХА, ресурсные состояния, факторы обстановки и обеспечивающие подсистемы. На рис. 5 представлена обобщённая структура основных классов и отношений геоонтологии ТХА.

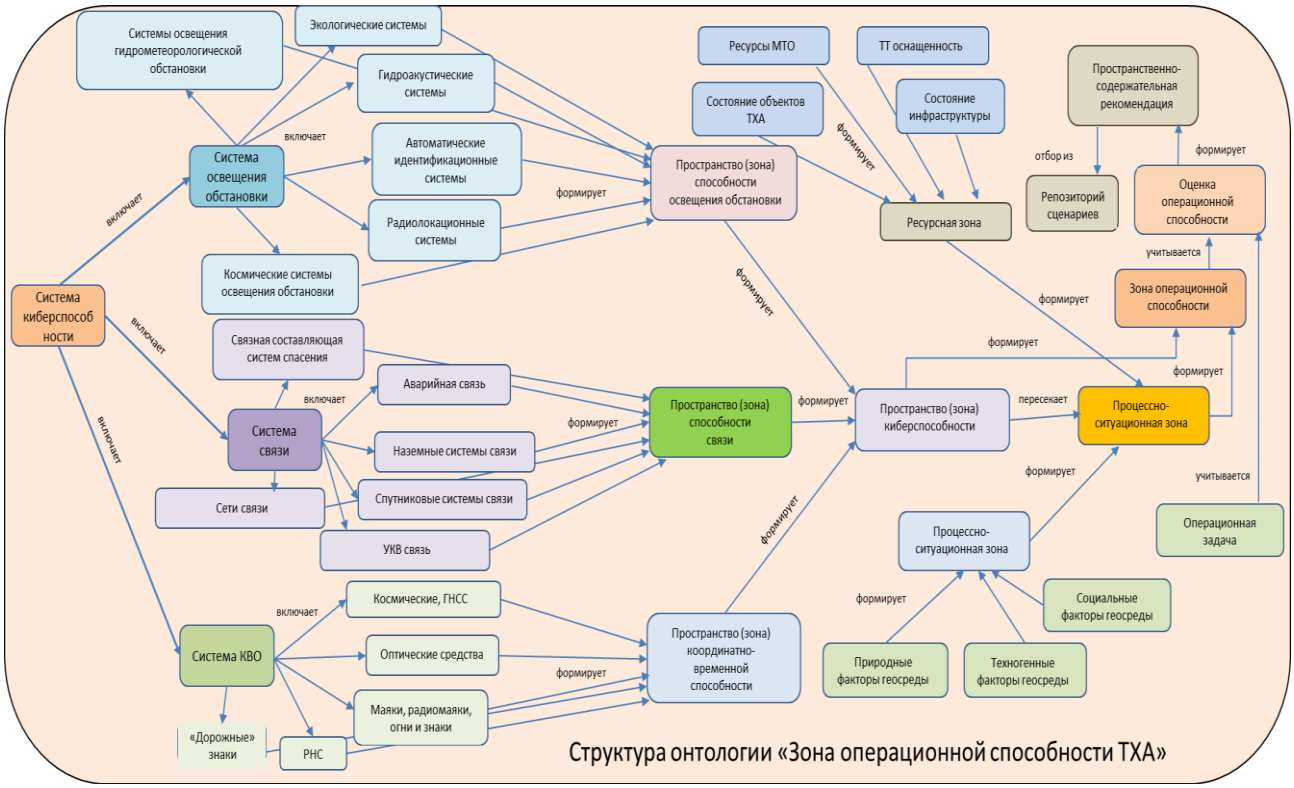


Рисунок 5. Структура онтологии «Зона операционной способности ТХА» и основные отношения между её сущностями: КВО – координатно-временное обеспечение; РНС – радионавигационные системы; ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы; МТО – материально-техническое обеспечение; ТТ – технико-технологический

Figure 5. Structure of the ontology “TEA Operational Capability Zone” and the main relations between its entities: CTS – coordinate-time support; RNS – radio navigation systems; GNSS – global navigation satellite systems; MTS — material and technical support; TT – technical and technological

Онтология операционной способности контроллинговой территории представляет географически определенную область ТХА как пространственно-временную систему взаимодействия объектов хозяйства, инфраструктуры, обеспечивающих организаций и органов управления в пределах операционной зоны. Операционная способность формируется пересечением ресурсного,

процессно-ситуационного и киберпространства; последнее определяется зонами наблюдаемости, управляемости и координируемости.

Машинная реализация онтологического подхода может быть выполнена в редакторе Protégé. В данном программном средстве формируются иерархии классов, объектные свойства, ограничения и правила вывода.

Для описания структуры предметной области выбран язык веб-онтологий OWL 2. Условные зависимости вида «если пространственные и содержательные условия выполнены, то зона или объект относятся к заданному классу» задаются правилами SWRL. Правило содержит тело и заключение. Тело включает совокупность атомов, которые должны быть истинны для одного набора индивидов; заключение задаёт новое утверждение, логически выводимое при выполнении условий. Общая форма правила записывается как:

$$B_1 \wedge B_2 \wedge \ldots \wedge B_n \rightarrow H_1 \wedge H_2 \wedge \ldots \wedge H_m, \quad (3)$$

где $B_1, \ldots, B_n$ – атомарные переменные правила; $H_1, \ldots, H_m$ – атомарные переменные заключения; символ ∧ обозначает логическую конъюнкцию; символ → – импликацию.

Пространственно-содержательный выбор управленческих рекомендаций, направленных на поддержание киберфизической способности контроллинговой зоны ТХА. Пространственно-содержательный выбор управленческих рекомендаций по обеспечению операционной способности зоны ТХА должен учитывать операционный риск соответствующей зоны, который формируется под воздействием неблагоприятных факторов природной, техногенной и социальной геосреды. Данные факторы локализуется относительно операционной зоны и связывается с геоситуацией, задачей, временным интервалом и возможными последствиями.

После задания классов, свойств и отношений формализуются правила вывода. SWRL интерпретирует уже рассчитанные и пространственно привязанные показатели, а оценка ресурсных ограничений, факторов обстановки и операционного риска выполняется геоинформационной методикой до запуска логического вывода. Рассмотрим пример базового правила геоонтологии ТХА, которое связывает управляемый геообъект с фактором геосреды, действующим в той же операционной зоне. Оно реализует переход от пространственного совпадения к содержательному отношению «подвержен воздействию».

$$locatedInOperationalZone(?\,Gob_i, ?\,Z_j) \wedge actsIn(?\,f_k, ?\,Z_j) \wedge CyberFactor(?\,f_k) \rightarrow \rightarrow affectedBy(?\,Gob_i, ?\,f_k), \quad (4)$$

где $?\,Gob_i$ – индивидуум класса $TXAObject$ или $CyberPhysicalGeoObject$; $?\,Z_j$ – индивидуум класса $OperationalZone$; $?\,f_k$ – индивидуум класса $CyberFactor$. Результатом вывода является отношение $affectedBy(?\,Gob_i, ?\,f_k)$. Оно используется при представлении объектов ТХА, испытывающих воздействие заданного фактора, и при последующей оценке пространственного дефицита киберфизической способности.

SWRL используется для логической интерпретации уже рассчитанных и пространственно привязанных результатов. Контекст выбора управленческого мероприятия для объекта Gob_i, расположенного в операционной зоне Z_j в момент времени t включает параметры ресурсной, процессно-ситуационной, киберфизической способности, событийные и управленческие признаки. Выбор конкретного мероприятия выполняется по функции предпочтительности.

Пример формально-логического вывода решения по поддержанию киберфизической способности контроллинговой зоны ТХА. Общая структура формально-логического вывода, служащего машинно-формализованным базисом для традиционной обобщенной методики геоконтроллинга территориально-распределенными процессами и явлениями может быть представлена как последовательность этапов: выделение сущностей геоонтологии, представляющих геообъекты модели обстановки; установление связей; выполнение анализа обстановки и оценки (как

отдельной семантической сущности, связанной с дальнейшей выработкой решения); выработки пространственно-содержательного решения в терминах онтологии, связанного отношениями с сущностями исходной геоситуации и оценочных данных.

Рассмотрим фрагмент геомодели ТХА. Для проверки пространственно-семантических условий используется запрос на языке SPARQL. SPARQL предназначен для выборки фактов из RDF-графа, а GeoSPARQL дополняет его пространственными классами, функциями и предикатами. В приведённом запросе префикс «:» обозначает пространство имён предметной онтологии ТХА, префикс geo: – использование функций (словаря) GeoSPARQL; оператор SELECT задаёт возвращаемые переменные, блок WHERE – требуемый фрагмент графа, предикат geo:sfWithin проверяет пространственное включение объекта в ячейку, а FILTER ограничивает выборку по числовому значению риска. Пример запроса GeoSPARQL выглядит следующим образом:

```
SELECT ?obj ?zone ?state ?risk
WHERE {
  ?obj a :MTAObject ;
      :hasCyberState ?state ;
      :hasCyberRisk ?risk .
  ?zone a :MTAZone ;
       :hasObservabilityLevel :Low ;
       :hasControllabilityLevel :Low ;
       :hasResponsePriority :High .
  ?obj geo:sfWithin ?zone .
  FILTER (?risk > 0.7)
}
```

Результатом запроса является множество объектов ТХА, расположенных в операционных зонах высокого приоритета с риском выше порога и хотя бы одним дефицитом киберфизической способности. Для одной зоны запрос может вернуть несколько строк, поскольку недостаточная наблюдаемость, нестабильная связь и недостаточность КВО формируют разные типы кандидатов мероприятия.

Управленческая рекомендация представляется самостоятельным геообъектом, связанным с операционной зоной, исходными объектами и событиями. Она содержит тип действия, приоритет, ответственный центр (принятия решений), ресурсные ограничения, временное окно, маршрут или район реализации, ожидаемое изменение операционной способности и статус исполнения. Это позволяет оценивать невязку между планируемым воздействием и фактическим состоянием операционной зоны.

Проведённые расчёты показали, что применение аппарата геоонтологии в составе программной ситуационно-предиктивной методики повышает оперативность формирования пространственно-содержательных рекомендаций по управлению ТХА. На горизонте 7 суток точность прогнозирования снижения операционной способности повысилась на 11% по сравнению с традиционной оценкой по разрозненным ресурсным и обстановочным показателям и на 7% по сравнению с ситуационно-предиктивным подходом без онтологического согласования пространственных, ресурсных, процессно-ситуационных и киберфизических данных. Полученные результаты обеспечили более раннюю локализацию зон операционного риска и обоснованный выбор режима деятельности и состава обеспечивающих мероприятий.

Заключение

1. Показана целесообразность применения онтологического подхода при формализации задач, ориентированных на машинную реализацию тех или иных процессов и явлений, т. к. строгое корректное семантическое описание в минимальной степени требует изменения структуры модели исследуемой предметной области при ее даже значительных трансформации и модификации.

2. Обоснован выбор ТХА в качестве объекта геоконтроллингового регулирования, т. к. данные системы характеризуются высокой степенью динамичности изменений факторов геоситуации, обширным территориальным охватом, многообразием процессов, протекающих с участием акторов ТХА.

3. Исследованы методы перехода от геоситуации в системе мониторингов к пространственно-содержательному решению задачи поддержания функциональной целостности ее технической подсистемы.

4. Разработано геоонтологическое расширение классического семантического описания геоконтроллинга ТХА для гибкого адаптивного учета пространственных аспектов территориального автоматизированного управления. Базовая онтология дополнена пространственными сущностями, геометриями, временными характеристиками, топологическими и метрическими отношениями.

5. Сформирована базовая геоонтология ТХА. В ней сущностные отношения связывают ключевые понятия с системой ТХА, зонами операционной и киберфизической способности, факторами геосреды и событиями. Структура классов, свойств, индивидов и ограничений реализована в редакторе Protégé.

6. Определена процессная направленность геоонтологии – описание и выделение ключевых сущностей операционного пространства объекта ТХА через зоны процессно-ситуационной, ресурсной и киберфизической способности.

7. Сформулированы правила логического вывода сценариев SWRL, связывающие пространственную локализацию объекта ТХА, задачу, геоситуацию, социальные и техногенные опасности, рекомендации. Правила обеспечивают вывод новых утверждений о состоянии, риске и требуемом действии.

8. Разработаны пространственно-семантические запросы SPARQL / GeoSPARQL которые позволяют связать базу сценариев с решаемой задачей поддержки ТХА.

9. Разработка и доведение до работающих программных методик продемонстрировала адекватность и работоспособность онтологического подхода для машинной реализации геоконтроллинга ТХА.

Список использованных источников

1.Панамарев, Г. Е., Биденко, С. И. Геоинформационная поддержка управления сложными территориальными объектами и системами: Монография. – Новороссийск: Изд-во ГМА, 2011. – 202 с.

The World of the Seafarer: Qualitative Accounts of Working in the Global Shipping Industry / ed. by V. O. Gekara, H. Sampson. — Cham : Springer, 2021. — VIII, 198 p. — (WMU Studies in Maritime Affairs ; vol. 9). — ISBN 978-3-030-49824-5.

2.Бакланов, П. Я. Территориальные структуры хозяйства в региональном управлении / П. Я. Бакланов; отв. ред. П. А. Минакир // Тихоокеанский институт географии ДВО РАН. — Москва: Наука, 2007. — 239 с. — ISBN 978-5-02-034115-9

3.Биденко, С. И., Самотонин, Д. Н., Яшин, А. И. Геоинформационные модели и методы поддержки управления: Монография. – СПб.: Изд-во ФВУ ПВО, 2003. – 224 с.

4.Биденко С.И., Звездарёв Д.В., Миляков Д.Ф., Михеев В.Л., Храмов И.С. Геоконтроллинг и моделирование рисковой территориальной активности / под ред. проф. С. И. Биденко: Монография. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. – 263 с.

5.Якушев Д.И., Биденко С.И. Геоинформационные управляющие системы и технологии: монография. – СПб: Изд-во СПбУ МВД, 2014. – 248 с.

OGC GeoSPARQL – A Geographic Query Language for RDF Data. Version 1.1: OGC Standard 22-047r1 / ed. by N. J. Car, T. Homburg, M. Perry [et al.]. Open Geospatial Consortium, 2024.

6.Дулин С.К., Никишин Д.А. Подходы к интеграции прикладных концептуальных схем в составе унифицированной геоонтологии // Системы и средства информатики. – 2020. – № 2 (30). – С. 68–77.
7.Лисицкий, Д.В. Трехмерная компьютерная картография: монография / Д.В. Лисицкий, П.Ю. Бугаков, А. Т. Нгуен. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – 178 с.
8.Попович В. В., Прокаев А. Н., Сорокин Р. П., Смирнова О. В. О распознавании ситуации на основе технологии искусственного интеллекта // Труды СПИИРАН. 2008. Вып. 7. С. 93–104.
9.Никишин Д.А. Проблемы формирования системы согласованных локальных географических онтологий // Системы и средства информатики. – 2023. – № 3 (33). – С. 85–94
10.Беляев, А.К. Программная методика ситуационно-предиктивного контроля радиоэлектронного оборудования в удаленном эксплуатационном районе / Беляев А.К., Шарков А. М., Дегтярев А.В. // Навигация и гидрография. – 2026. – № 2 (82). – С. 84–93.

References

1.Panamarev G.E., Bidenko S.I. Geoinformation support for managing complex territorial objects and systems. Novorossiysk: GMA Publishing House, 2011. 202 p.
2.Gekara V.O., Sampson H. (eds.). The World of the Seafarer: Qualitative Accounts of Working in the Global Shipping Industry. Cham: Springer, 2021. 198 p. ISBN 978-3-030-49824-5.
3.Baklanov P.Ya. Territorial structures of the economy in regional management / ed. by P.A. Minakir. Moscow: Nauka, 2007. 239 p. ISBN 978-5-02-034115-9.
4.Bidenko S.I., Samotonin D.N., Yashin A.I. Geoinformation models and methods of management support. St. Petersburg: FVU PVO Publishing House, 2003. 224 p.
5.Yakushev D.I., Bidenko S.I. Geoinformation control systems and technologies. St. Petersburg: St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs Publishing House, 2014. 248 p.
Car N.J., Homburg T., Perry M. et al. OGC GeoSPARQL – A Geographic Query Language for RDF Data. Version 1.1: OGC Standard 22-047r1. Open Geospatial Consortium, 2024.
6.Dulin S.K., Nikishin D.A. Approaches to the integration of applied conceptual schemes within a unified geo-ontology // Systems and Means of Informatics. - 2020. - No. 2 (30). - P. 68-77.
7.Lisitskiy D.V., Bugakov P.Yu., Nguyen A.T. Three-dimensional computer cartography. Novosibirsk: SSUGT, 2016. 178 p.
8.Popovich V.V., Prokaev A.N., Sorokin R.P., Smirnova O.V. Situation recognition based on artificial intelligence technology // SPIIRAS Proceedings. - 2008. - No. 7. - P. 93-104.
9.Nikishin D.A. Problems of forming a system of coordinated local geographic ontologies // Systems and Means of Informatics. - 2023. - No. 3 (33). - P. 85-94.
10.Belyaev A.K., Sharkov A.M., Degtyarev A.V. Software methodology for situational-predictive control of radio-electronic equipment in a remote operational area // Navigation and Hydrography. - 2026. - No. 2 (82). - P. 84-93.

GEOCONTROLLING OF TERRITORIAL ECONOMIC ACTIVITY: A MACHINE-ORIENTED ONTOLOGICAL APPROACH TO MODELING AN ACTOR-BASED OPERATIONAL ZONE

Belyaev Alexander K.
Expert Analyst
JSC Signal-I
Saint Petersburg
E-mail: alexbel3101@yandex.ru

Bidenko Sergey I.
Doctor of Technical Sciences, Professor
Senior Expert Analyst
JSC Signal-I
Saint Petersburg
E-mail: sibidenko@mail.ru

Zvezdarev Dmitry V.
Candidate of Technical Sciences
Deputy Director General
JSC NIIAA
Moscow
E-mail: dzvezdarev@mail.ru

Kalganov Victor A.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
First Deputy Head
National Defense Management Center of the Russian Federation
Moscow
E-mail: ncuorf@mil.ru

Serditova Natalia E.
Doctor of Geographical Sciences, Professor
Vice-Rector
Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)
Moscow
E-mail: serditovane@miigaik.ru

© Беляев А.К., Биденко С.И., Звездарёв Д.В., Калганов В.А., Сердитова Н.Е., 2026

РАЗДЕЛ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СТАТИСТИКА

SECTION SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT, INFORMATION PROCESSING AND STATISTICS

УДК 004.9:656.61.052

Уйар Д. Х., Мартын И. А.

АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И МАРШРУТИЗАЦИИ МОРСКИХ СУДОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОЙ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ

Уйар Денис Хусейнович
студент группы ПИ-Б22-1
Институт информационных систем и геотехнологий
ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург
E-mail: pred_game@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

Аннотация. *Разобщённость навигационных инструментов — одна из ключевых практических проблем арктического судоходства: спутниковый мониторинг льда, алгоритмы выбора маршрута и картографическая визуализация существуют как отдельные сервисы без единого интеграционного контура. В статье описана информационная система, которая объединяет эти функции в одном пользовательском интерфейсе. Архитектура системы строится по четырёхуровневой схеме: уровень представления на базе Leaflet.js, прикладной уровень на Flask с REST API, уровень предметной области с графовым алгоритмом маршрутизации и оценкой риска, инфраструктурный уровень с хранением данных в MySQL и обработкой пространственных форматов GeoTIFF и GeoJSON. Сравнение с существующими решениями показало, что ни MarineTraffic, ни IceEye, ни Windward не обеспечивают полного цикла — от получения ледовых данных до формирования навигационных рекомендаций. Прототип прошёл функциональное тестирование по четырём направлениям и подтвердил работоспособность основных сценариев; выявленные ограничения обусловлены демонстрационным характером реализации и определяют приоритеты дальнейшего развития.*

Ключевые слова: *арктическое судоходство, информационная система, мониторинг ледовой обстановки, маршрутизация судов, геоинформационные технологии, Leaflet.js, REST API, графовые алгоритмы, оценка риска, Северный морской путь.*

ARCHITECTURE OF AN INFORMATION SYSTEM FOR MARITIME VESSEL MONITORING AND ROUTING UNDER ARCTIC ICE CONDITIONS

Abstract. *The fragmentation of navigation tools is one of the key practical problems in Arctic shipping: satellite ice monitoring, route planning algorithms, and cartographic visualization exist as separate services without a unified integration framework. This article describes an information system that brings these functions together in a single user interface. The system architecture follows a four-layer scheme: a presentation layer based on Leaflet.js, an application layer on Flask with REST API, a domain layer with a graph-based routing algorithm and risk assessment, and an infrastructure layer with MySQL storage and processing of GeoTIFF and GeoJSON spatial formats. A comparison with existing solutions showed that neither MarineTraffic, IceEye, nor Windward provides a complete cycle — from obtaining ice data to generating navigational recommendations. A prototype underwent functional testing in four areas and confirmed the operability of the main scenarios; the identified limitations are determined by the demonstration nature of the implementation and define the priorities for further development.*

Keywords: *Arctic shipping, information system, ice condition monitoring, vessel routing, geoinformation technologies, Leaflet.js, REST API, graph algorithms, risk assessment, Northern Sea Route.*

Введение. Северный морской путь за последние годы превратился из нишевого коридора в стратегически значимую транспортную артерию. Рост транзитного трафика и одновременное усложнение ледовой обстановки — лёд становится более неоднородным, а периоды навигационной доступности труднее прогнозируются — предъявляют к качеству маршрутных решений всё более высокие требования [1, 2].

На практике картина выглядит так: диспетчер или капитан работает одновременно с несколькими независимыми сервисами. Один отображает спутниковый снимок льда, другой строит маршрут, третий выдаёт метеосводку. Свести всё это воедино приходится вручную, под давлением времени. Положение усугубляется двумя обстоятельствами. Во-первых, данные дистанционного зондирования из одного источника интерпретируются разными алгоритмами по-разному, что порождает расхождения в оценке проходимости [7]. Во-вторых, фактическая скорость судна в ледовых условиях определяется не только толщиной льда, но и торосистостью, структурой и динамикой покрова — параметрами, которые большинство упрощённых сервисов не учитывают [8].

Настоящая работа направлена на устранение этого разрыва: разработанная система объединяет мониторинг ледовой обстановки, расчёт маршрута с учётом ледовых ограничений, оценку риска и геоинформационную визуализацию в едином интерфейсе — без необходимости переключаться между разными инструментами.

Анализ существующих решений и постановка задачи. Среди наиболее распространённых навигационных платформ — MarineTraffic, IceEye и Windward. Каждая из них сильна в своей нише: MarineTraffic обеспечивает отслеживание судов по AIS-данным в режиме, близком к реальному времени; IceEye поставляет спутниковые снимки высокого разрешения; Windward ориентирован на коммерческую логистическую аналитику. Однако ни одна из них не предназначена для комплексной поддержки арктической навигации — в частности, для маршрутизации с учётом реальной ледовой нагрузки [5, 6].

Проблема, которую это порождает, хорошо отражена в научной литературе. Данные дистанционного зондирования, полученные из одного источника, могут интерпретироваться по-

разному в зависимости от применяемых алгоритмов, что приводит к расхождениям в оценке проходимости отдельных участков акватории [7]. При этом фактическая скорость судна в ледовых условиях определяется не только толщиной льда, но и его торосистостью, структурой и динамикой — параметрами, которые упрощённые сервисы, как правило, не учитывают [8].

Сравнительный анализ представлен в таблице 1. Из него следует, что задача проектируемой системы — устранить разрыв между сбором ледовой информации и принятием навигационного решения: мониторинг обстановки, расчёт маршрута, оценка риска и картографическая визуализация должны работать в едином контуре, а не как разрозненные инструменты.

Таблица 1. Сравнение существующих навигационных решений

Table 1. Comparison of existing navigation solutions

Критерий	Разрабатываемая система	MarineTraffic	IceEye	Windward
Арктическая навигация	Приоритетная	Частичная	Частичная	Частичная
Ледовая обстановка	Реализован	Частично	Реализован	Ограниченно
Маршрутизация	Реализована	Базовая	Отсутствует	Частичная
Рекомендации	Реализовано	Ограниченно	Частично	Аналитика
ГИС-визуализация	Реализована	Частично	Отсутствует	Ограниченно
Внешние данные	API + погода	AIS-данные	Спутниковые	Аналитические

Архитектура разрабатываемой информационной системы. В основу архитектурного решения положен принцип разделения ответственности: каждый уровень системы отвечает за строго определённую область, и изменения в одном не затрагивают логику остальных. Такой подход упрощает сопровождение и позволяет развивать компоненты независимо — что особенно важно с учётом того, что спутниковые продукты мониторинга и алгоритмы анализа ледовой обстановки обновляются быстро [9, 10].

В составе архитектуры выделены четыре уровня (таблица 2).

Уровень представления построен на Leaflet.js. Выбор этой библиотеки обусловлен её лёгкостью, поддержкой растровых и векторных слоёв, а также широкими возможностями настройки поведения карты. Пользователь видит ледовые слои, маршрут и зоны риска на единой интерактивной карте; боковые панели отображают текущие параметры обстановки и сформированные рекомендации.

Таблица 2. Уровни архитектуры информационной системы

Table 2. Levels of information system architecture

Уровень	Компоненты	Функции
Представления (UI Layer)	Leaflet.js, интерактивная карта, боковые панели	Отображение ледовых слоёв, маршрутов и зон риска; взаимодействие с пользователем
Прикладной (Application Layer)	Flask, REST API, контроллеры маршрутов	Обработка запросов, координация модулей, управление сценариями

Уровень	Компоненты	Функции
Предметной области (Domain Layer)	Алгоритм маршрутизации, оценка риска	Построение оптимального маршрута, расчёт проходимости, формирование предупреждений
Инфраструктурный (Infrastructure Layer)	MySQL, внешние API, модуль геоданных	Хранение данных, обработка GeoTIFF/GeoJSON, интеграция внешних сервисов

Прикладной уровень реализован на Flask. Взаимодействие клиентской и серверной частей построено по принципу REST: клиент отправляет запрос с координатами или параметрами маршрута, сервер возвращает JSON с результатом расчёта. Такая схема легко масштабируется и не требует изменений на стороне клиента при подключении новых источников данных [9].

Уровень предметной области включает две ключевые подсистемы. Алгоритм маршрутизации работает с графовой моделью акватории: каждому участку назначается весовой коэффициент, отражающий ледовую нагрузку — сплочённость, торосистость, проходимость. Поиск оптимального пути сочетает графовый обход с элементами динамического программирования, что позволяет учитывать изменение условий вдоль трассы [11, 12, 13]. Параллельно функционирует подсистема оценки риска, которая анализирует метеоданные и ледовую обстановку и формирует предупреждения при превышении пороговых значений.

Инфраструктурный уровень обеспечивает хранение данных в MySQL и взаимодействие с внешними сервисами через слой адаптеров. Это изолирует прикладную логику от специфики конкретных API: при смене источника ледовых данных достаточно обновить соответствующий адаптер — логика маршрутизации остаётся неизменной. Пространственные данные передаются в форматах GeoTIFF и GeoJSON; координатные преобразования выполняются средствами библиотеки PyProj.

Ключевые функциональные модули. Получение актуальных данных о ледовой обстановке — отправная точка всей цепочки расчётов. Внешние API поставляют агрегированные сведения о сплочённости и распределении льда; при поступлении данные верифицируются, приводятся к единой схеме хранения и формируют обновлённую модель акватории. Без этого шага любой маршрутный расчёт окажется оторван от реальных условий навигации.

Центральная вычислительная задача системы — построение оптимального пути в условиях изменяющейся ледовой нагрузки. Акватория разбивается на участки, каждому из которых присваивается значение проходимости; алгоритм формирует несколько альтернативных маршрутов, различающихся по времени перехода и уровню риска. Все варианты передаются на картографический уровень для визуального сравнения пользователем.

Отдельного рассмотрения заслуживает подсистема оценки риска. В ходе разработки выяснилось, что пороговые значения нельзя задать универсально: условия на разных участках Северного морского пути существенно различаются, поэтому оценка строится на комбинации ледовых параметров и метеоданных из OpenWeatherMap. При ухудшении любого из контролируемых показателей — рост уровня льда, усиление ветра, резкое падение температуры — система пересматривает оценку и выдаёт предупреждение с привязкой к конкретному участку маршрута.

Картографическая составляющая решает не только задачу отображения, но и задачу удобства восприятия. Ледовые слои, маршруты и зоны риска представлены в виде интерактивных объектов; клик по любому элементу открывает всплывающее окно с детальными параметрами обстановки. Это

соответствует принципам проектирования систем поддержки принятия решений: вся необходимая информация доступна в одно действие, без дополнительного поиска [4, 6].

Информационные потоки и интеграция. Ключевая сложность при интеграции разнородных источников состоит не в различии технических форматов, а в обеспечении их согласованного обновления. Слой адаптеров решает эту задачу: каждый внешний сервис снабжён собственным адаптером, преобразующим данные в единый внутренний формат. При смене поставщика ледовой информации заменяется только адаптер — алгоритм маршрутизации при этом не затрагивается.

Движение данных внутри системы организовано следующим образом. Из внешних источников поступают три потока: сведения о ледовой обстановке, координаты и параметры судов (AIS), метеорологические данные. После верификации и нормализации данные распределяются по модулям: ледовые параметры передаются в алгоритм маршрутизации, метеоданные — в подсистему оценки риска. Результаты расчёта — готовые маршруты, зоны риска, предупреждения — направляются на уровень представления и отображаются на карте. Пространственные данные на всех этапах цикла передаются в формате GeoJSON, что обеспечивает совместимость с Leaflet.js.

Проверка работоспособности системы. Тестирование прототипа охватывало четыре направления: пользовательский интерфейс, серверное взаимодействие, обработку геопространственных данных и оценку риска. Задача состояла в проверке корректности основной логики на типовых сценариях, а не в нагрузочном тестировании.

Проверка пользовательского интерфейса подтвердила корректную загрузку карты, непрерывное отображение маршрута и цветовую индикацию зон риска. При выборе участка на карте открывается всплывающее окно с параметрами обстановки. На уровне взаимодействия с сервером установлено, что при корректном запросе возвращается полный набор данных — температура, ветер, давление, уровень льда; при некорректных входных данных формируется диагностическое сообщение без отказа сервиса.

Обработка пространственных данных прошла без замечаний: границы GeoTIFF-файлов определяются правильно, координатные преобразования выполняются без ошибок, слои корректно привязаны к географическому положению. Подсистема оценки риска сформировала предупреждения на всех тестовых наборах именно в тех случаях, когда пороговые значения были превышены.

Устойчивость к сбоям проверялась отдельно: при недоступности внешнего API интерфейс сохраняет работоспособность, а пользователю выводится сообщение об отсутствии актуальных данных.

Заключение. Задача, поставленная в начале работы, состояла в объединении разрозненных инструментов арктической навигации в единую систему. Разработанная архитектура решает её через четырёхуровневую схему: Leaflet.js на уровне представления, Flask с REST API на прикладном уровне, графовый алгоритм маршрутизации и оценка риска в доменном ядре, MySQL и адаптеры внешних API в инфраструктуре.

В отличие от существующих платформ, предложенная система замыкает полный цикл — от получения ледовых и метеоданных до формирования маршрутных рекомендаций оператору — в едином пользовательском интерфейсе. Модульная архитектура не является самоцелью: она позволяет заменить алгоритм маршрутизации более точным или подключить новый источник спутниковых данных без переработки остальных компонентов.

Реализованный прототип подтвердил техническую осуществимость подхода. Приоритетными направлениями дальнейшего развития являются: подключение спутниковых продуктов высокого разрешения, внедрение статистических моделей скорости судна во льдах на основе исторических

данных AIS, а также повышение точности порогов оценки риска путём калибровки на материалах реальных рейсов.

Список использованных источников

1. Алёшин А. А., Кубрин С. С. Применение метода оптимизации маршрута судна в ледовых условиях с точки зрения системы управления безопасностью // Вестник ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14, № 4. — С. 546–554.

2. Zhao P., Li Y., Zhang C. et al. Arctic Sea Route access reshapes global shipping carbon emissions // Nature Communications. — 2025. — Vol. 16. — Art. 8431.

3. Brigham L. W. Future Arctic marine navigation: Complexity and uncertainties // Oceanography. — 2022. — Vol. 35, № 3–4. — P. 178–179.

4. Wu A., Che T., Li X., Zhu X. A ship navigation information service system for the Arctic Northeast Passage using 3D GIS based on big Earth data // Big Earth Data. — 2021.

5. Liu Q., Wang Y., Zhang R. et al. Arctic weather routing: a review of ship performance models and ice routing algorithms // Frontiers in Marine Science. — 2023. — Vol. 10. — Art. 1190164.

6. Poo M. C.-P., Yang Z., Lau Y.-Y., Jarumaneeroj P. Assessing the impact of Arctic shipping routes on the global container shipping network's connectivity // Polar Geography. — 2024. — Vol. 47, № 3. — P. 219–239.

7. Ананьева А. А. Навигация в Арктике: спутниковые стратегии повышения безопасности на море // Universum: технические науки. — 2024. — № 2(119).

8. Ольховик Е. О. Исследование изменения скорости крупнотоннажных судов в ледовых условиях акватории СМП // Вестник ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10, № 4. — С. 705–712.

9. Fielding R. T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures: diss. — University of California, Irvine, 2000. — 162 p.

10. Perry D. E., Wolf A. L. Foundations for the Study of Software Architecture // ACM SIGSOFT Software Engineering Notes. — 1992. — Vol. 17, № 4. — P. 40–52.

11. Гриняк В. М., Акмайкин Д. А., Иваненко Ю. С. Планирование маршрута перехода судна с учётом параметров ледовой обстановки // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2022. — Т. 10, № 3.

12. Андреева Е. В., Тезиков А. Л. Поиск оптимальных судоходных маршрутов в акватории арктических морей // Вестник ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15, № 2. — С. 191–199.

13. Таровик О. В. Модели для прогнозирования параметров рейсов судов в Арктике: существующие подходы и возможные пути развития // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 422–435.

References

1. Alyoshin A. A., Kubrin S. S. Application of the method of ship route optimization in ice conditions from the standpoint of the safety management system // Vestnik GUMRF. — 2022. — Vol. 14, No. 4. — Pp. 546–554.

2. Zhao P., Li Y., Zhang C. et al. Arctic Sea Route access reshapes global shipping carbon emissions // Nature Communications. — 2025. — Vol. 16. — Art. 8431.

3. Brigham L. W. Future Arctic marine navigation: Complexity and uncertainties // Oceanography. — 2022. — Vol. 35, No. 3–4. — P. 178–179.

4. Wu A., Che T., Li X., Zhu X. A ship navigation information service system for the Arctic Northeast Passage using 3D GIS based on big Earth data // Big Earth Data. — 2021.

5. Liu Q., Wang Y., Zhang R. et al. Arctic weather routing: a review of ship performance models and ice routing algorithms // Frontiers in Marine Science. — 2023. — Vol. 10. — Art. 1190164.

6. Poo M. C.-P., Yang Z., Lau Y.-Y., Jarumaneeroj P. Assessing the impact of Arctic shipping routes on the global container shipping network's connectivity // Polar Geography. — 2024. — Vol. 47, No. 3. — Pp. 219–239.

7. Ananyeva A. A. Navigation in the Arctic: satellite strategies for maritime safety enhancement // Universum: Technical Sciences. — 2024. — No. 2(119).

8. Olkhovik E. O. Investigation of speed changes in large-tonnage vessels in ice conditions of the NSR // Vestnik GUMRF. — 2018. — Vol. 10, No. 4. — Pp. 705–712.

9. Fielding R. T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures: diss. — University of California, Irvine, 2000. — 162 p.

10. Perry D. E., Wolf A. L. Foundations for the Study of Software Architecture // ACM SIGSOFT Software Engineering Notes. — 1992. — Vol. 17, No. 4. — Pp. 40–52.

11. Grinyak V. M., Akmaykin D. A., Ivanenko Yu. S. Vessel route planning with consideration of ice conditions // Modelling, Optimization and Information Technologies. — 2022. — Vol. 10, No. 3.

12. Andreeva E. V., Tezikov A. L. Search for optimal shipping routes in Arctic seas // Vestnik GUMRF. — 2023. — Vol. 15, No. 2. — Pp. 191–199.

13. Tarovik O. V. Models for predicting voyage parameters of vessels in the Arctic: existing approaches and possible directions // Arctic: Ecology and Economy. — 2021. — Vol. 11, No. 3. — Pp. 422–435.

ARCHITECTURE OF AN INFORMATION SYSTEM FOR MARITIME VESSEL MONITORING AND ROUTING UNDER ARCTIC ICE CONDITIONS

Uyar Denis Kh.

student, group PI-B22-1

Institute of Information Systems and Geotechnologies

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg

Martyn Irma A.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg

© Уйар Д.Х., Мартын И.А., 2026

УДК 006.72

Якушев Д.И.

ИНФОРМАЦИЯ В СТРУКТУРЕ ГЕОДАННЫХ: СВОЙСТВО ОСОЗНАННОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТИ

Якушев Денис Игоревич
Кафедра Информационной безопасности
ФГКОУ ВО Санкт-Петербургский университет МВД России
г. Санкт-Петербург
E-mail: d.i.ya@yandex.ru

Аннотация. *В статье предлагается новое определение понятия «информация», раскрывающее ее место в окружающей действительности. Показана непротиворечивость предложенного определения «информации» и существующих определений, отражающих взгляды на это понятие. Обосновано различие между понятиями «информация» и «данные». Показано, что между самим объектом и информацией о нем всегда существуют различия, в пределе основывающиеся на соотношении неопределённостей Гейзенберга. Представляется, что предложенное определение информации может быть принято, как в технических, так и в гуманитарных науках.*

Ключевые слова: *информация, геоданные, окружающая действительность.*

INFORMATION IN THE GEODATA STRUCTURE: THE PROPERTY OF CONSCIOUS REPRESENTATION OF THE SURROUNDING REALITY

Abstract. *Before we start discussing anything, it is necessary to agree on definitions. The definition is intended to distinguish the object of discussion from the surrounding reality. The required selection is made using a set of features that, in their entirety, are unique to this object. One of the most commonly used terms is «information», which does not have a universally accepted definition. There are many of them. Based on the consideration of the existing definitions of the term «information», the following conclusions can be drawn: 1. There is a direct connection between information and the surrounding reality. Information makes it possible to form ideas about the surrounding reality, about what is happening. 2. What exists before perception by the subject is not information. It seems that based on the above, it is possible to propose the following definition of «information»: Information is a conscious copy of the surrounding reality. The proposed definition, in particular, explains N. Wiener's statement: «Information is not matter or energy». Indeed, information is not matter, it is a copy of it. In addition, the proposed definition of information does not contradict other existing definitions of this concept, only helping to disclose their content. Both biological and technical systems cannot perceive not only the entire object in all its manifestations, but also individual manifestations of the object in their entire range. Therefore, when it comes to a copy, it is understood that it is a copy of only one (possibly several, for example, video with sound) of the manifestations of the object, limited by the characteristics of the copying system. Obtaining a copy (measurement) with zero error is impossible due to the Heisenberg uncertainty ratio. It is shown that the proposed definition does not require fundamental changes, but is within the framework of the existing system of views, revealing the concept of «information» and clarifying its place in the surrounding reality.*

Keywords: *definition, information, surrounding reality, data.*

Введение. Прежде чем мы начинаем что-либо обсуждать, необходимо договориться об определениях. О том, какое именно содержание мы вкладываем в то или иное понятие. Это действие необходимо, чтобы обеспечить единообразное понимание того, о чём же именно идёт речь. Если этот шаг не сделать на начальном этапе, к нему неминуемо придётся возвращаться, и многое начинать сначала, а время будет потеряно. Важность и необходимость этого шага признаёт и законодатель. Статья два многих федеральных законов посвящена именно определениям, тому, какой смысл вкладывает законодатель в тот или иной термин.

Определение призвано выделить объект обсуждения из окружающей действительности. Требуемое выделение производится с помощью комплекса признаков, которые в своей совокупности присущи только этому объекту. Заметим, что в данном случае речь идёт об определении групповой принадлежности, например, определяется «человек» вообще, а не конкретный человек.

Признаки, входящие в определение, подразделяются на родовой, присущий крупному классу объектов, и видовые, уточняющие характеристики интересующего объекта в рамках этого крупного класса.

Все просто, пока делать не начнёшь. Например, один из самых употребляемых терминов - «информация», не имеет принимаемого всеми определения [1]. Их существует множество, причём, у многих из них разнятся даже родовые признаки.

В статье на основании анализа существующих определений термина «информация» и соотнесения их с окружающей действительностью обосновывается новое определение этого термина и его место этого понятия в окружающей действительности.

Выработка определения термина «информация» и соотнесение его с существующими представлениями. Ниже приведены некоторые определения «информации»:

- «Сведения (сообщения, данные) независимо от формы их представления» [2].

- «Сведения (сообщения, данные) независимо от формы их представления, которые воспринимаются человеком и/или специальными устройствами в процессе коммуникации» [3]. Вопрос: А животными информация не воспринимается?

- «Сведения об окружающем мире и протекающих в нём процессах, воспринимаемые человеком или специальным устройством» [4].

- «Обработанные, организованные и связанные данные, которые порождают смысл (значение)» [5].

- «Осведомление кого-л. о положении дел в какой-л. области, о каких-л. событиях и т. п.; информирование» [6].

- «Информацией считают снятую неопределённость наших знаний о чём-то» (К. Шеннон).

- «Информация — это обозначение содержания, полученного из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приспособления к нему наших чувств» (Н. Винер).

Один из подходов к определению информации рассматривает её как свойство материи [7]. Свойство - это отличительная особенность, что не является обязательным признаком информации.

В некоторые из определений «информации» введены признаки которые не выделяют понятие «информация» из окружающей действительности, а присущи информации только в какой-либо ограниченной области деятельности, т. е. признаки классификации информации. Например, «Информация (в области обработки информации): Любые данные, представленные в электронной форме, написанные на бумаге, высказанные на совещании или находящиеся на любом другом

носителе, используемые финансовым учреждением для принятия решений, перемещения денежных средств, установления ставок, предоставления ссуд, обработки операций и т. п., включая компоненты программного обеспечения системы обработки» [8].

Исходя из выше изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Между информацией и окружающей действительностью существует прямая связь. Информация дает возможность сформировать представления об окружающей действительности, о том, что происходит.

2. То, что существует до восприятия субъектом[1], информацией не является.

Представляется, что исходя из сказанного возможно предложить следующее определение «информации»:

Информация - это осознанная копия окружающей действительности.

Предложенное определение, в частности, объясняет высказывание Н. Винера: «Информация есть информация, а не материя и не энергия». Действительно, информация - это не материя, это - её копия.

Рассмотрим другие определения «информации».

- «Информация — это отрицание энтропии» (Л. Бриллюэн). Энтропия - это мера неопределённости. Если мы получаем копию объекта, то неопределённость знаний об этом об объекте снижается.

- «Информация — это мера сложности структур» (А. Моль). «Сложность структур» подразумевает количество информации, необходимое для адекватного описания структуры. Используя предложенное определение «информации» можно перефразировать: «Чем сложнее объект исследования, тем большее количество копий требуется для его адекватного описания».

- «Информация — это отражённое разнообразие» (А.Д. Урсул). Отражение — это копия, а разнообразие — это окружающая действительность.

- «Информация — это содержание процесса отражения» (А.Г. Тузов). Можно перефразировать: информация — это то, что содержится в копии, её смысл.

- «Информация — это вероятность выбора» (И.М. Яглом). Выбор производится в сознании (теоретика или программиста). А вероятность выбора зависит как от той копии, которая осознаётся, так и от той информации, которая уже обработана.

«Часто говорят, что вычислительная машина производит новую информацию. Это в действительности не так. Машины могут обрабатывать информацию: они берут сырой материал и выдают законченный продукт, но общее количество информации не возрастает» [9]. Действительно, при обработке данных возможно выделить то, на что не обратили внимание до обработки, но объём исходных данных при обработке не возрастает.

Иногда говорят о передаче генетической информации в живой природе. С позиций предложенного определения об информации (о чём-либо осознанном) здесь речь не идёт. Есть репликация (копирование) генов, это, да, но об осознании речь не идёт.

Таким образом, предложенное определение информации не противоречит и другим существующим определениям этого понятия, лишь помогая раскрывать их содержание.

Подробнее остановимся на словосочетании «копия окружающей действительности».

[1] Субъект - существо, обладающее сознанием и волей, способностью к целесообразной деятельности, направленной на тот или иной объект. // Большой толковый словарь русского языка. URL: https://gramota.ru/poisk?query=%D1%81%D1%83%D0%B1%D1%8A%D0%B5%D0%BA%D1%82&mode=slovari&dicts[]=42&ysclid=mnj0unfmif735525675 (дата обращения: 03.04.2026).

Органы чувств человека, воспринимающие информацию из окружающего мира, имеют ограничения, сформировавшиеся за время эволюции Homo sapiens. Воспринимаемый зрением человека диапазон частот не включает инфракрасное и ультрафиолетовое излучение. Воспринимаемый слухом человека диапазон частот не включает инфра- и ультразвуковые волны. Вкусовой и обонятельный диапазон восприятия человека значительно уступает тем же характеристикам, например, собаки. Тактильные ощущения человека имеют порог чувствительности. И это не говоря о других каналах восприятия информации из внешнего мира, которые у человека оказались не развиты. Например, змеи чувствуют перепад температур до тысячных долей градуса, а акулы — разницу в силе электрического тока в 5 мкА.

Аналогичные ограничения в полной мере характерны и для технических устройств, предназначенных для получения и воспроизведения информации. Поскольку большинство из них предназначены для непосредственного восприятия информации человеком, они работают только в диапазонах частот, приближенных к человеческому восприятию. Кроме того, для всех устройств определены как род фиксируемой физической величины (ток, напряжение и т. д.), так и порог чувствительности — минимальное воздействие фиксируемой величины, на которое отреагирует техническое устройство.

Таким образом, как биологические, так и технические системы не могут воспринимать не только весь объект во всех его проявлениях, но и отдельные проявления объекта во всем их диапазоне.

Поэтому, когда речь идёт о копии, то подразумевается, что это копия только одного (возможно, нескольких, например, видео со звуком) из проявлений объекта, ограниченная характеристиками системы копирования. Например, в случае зрения или слуха — это ограничение диапазона частот, а в случае вкуса — это ограничение количества воспринимаемых конфигураций молекул. В общем случае под системой копирования понимается вся совокупность средств передачи и фиксации данных с присущими им характеристиками на пути от объекта к его копии.

Определения «копии», приведенные ниже, подтверждают сделанный вывод:

«Большой толковый словарь русского языка» [10] определяет копию как:

1. Точно соответствующее подлиннику воспроизведение чего-либо.

Если речь идёт о снятии копии с документов то, в большинстве случаев, это определение приемлемо. Хотя, строго говоря, «точно соответствующее» здесь не уместно, поскольку точного соответствия здесь быть не может. Например, с криминалистической точки зрения, нельзя получить копию документа на той же бумаге или отразить нажим и точки начала штрихов. Кроме того, термин «воспроизведение» для фото, например, точнее будет заменить на «фиксацию мгновенного значения».

2. Разговорное: о ком-, чём-либо очень похожем на другого, другое.

Дочь — точная копия матери.

Это, действительно, разговорное употребление термина «копия», поскольку, когда речь идёт о схожести, должны быть указаны признаки, по которым объекты являются схожими. О признаках же здесь и не упоминается.

Те же два значения термина «копия» приводятся и в «Большом толковом словаре русских существительных» [11], и в «Толковом словаре Ожегова» [4].

«Копия (от лат. *copia* — множество) — (юридическое), точное воспроизведение текста какого-либо документа» [12]. Действительно, если речь идёт о печатных символах, то «точное воспроизведение» возможно обеспечить. Тут, однако, в качестве обязательного условия выступает ограниченный набор стандартизованных символов. Если же речь идёт о, допустим, скорописи XV—XVII веков, то о «точном воспроизведении» говорить не приходится.

«Копия документа: Документ, полностью воспроизводящий информацию подлинника и все его внешние признаки или их часть» [13].

«Копия — (лат. *copia*). 1) точный снимок, список с чего-нибудь гравированием, переписыванием или рисованием. 2) копия, снятая самим автором, наз. дублетом. 3) в разговорн. яз. означает совершенное сходство с кем или чем-либо» [14].

Здесь сфера применения термина «копия» ограничена, в основном, сферой искусства.

Схожие определения даны и в других словарях. Например, [15].

В некоторых работах приходится встречаться с отнесением информации к нематериальному миру, например: «Информация нематериальна, но содержится в материальных сообщениях, которые генерируются материальными источниками сообщений» [16]. Представляется, что подобное возможно лишь при отчаянных попытках раскрыть содержание ранее не определенного понятия. С точки зрения предложенного определения в этом случае «нематериальной» объявляется копия материального объекта, хотя её носитель признается материальным.

Иногда речь заходит об «информации, не имеющей объективного отражения в природе и обществе» (например, в теологии) [17]. С позиций предложенного определения это информацией не является, поскольку не является копией окружающей действительности. Это — копия представлений, соответствие которых окружающей действительности далеко не очевидно.

Проведённый анализ определений понятия «копия» подтверждает сделанный ранее вывод о том, что копия подразумевает отражение только одного (возможно, нескольких) из проявлений объекта, с погрешностями, определяемыми характеристиками системы копирования. Получение копии (измерения) с нулевой погрешностью невозможно ввиду соотношения неопределённостей Гейзенберга.

Потенциально дискуссионным является введение в определение «информации» признака «осознанная» (копия). Тогда чем же являлась информация до осознания? Во многих случаях удобно говорить о том, что до осознания информация являлась данными. То есть данные — это копия окружающей действительности. В частности, это не противоречит определению, данному в стандарте *ISO/IEC/IEEE* 24765:2010 (№ 3.704 — *data*): «Данные — это представление фактов, концепций или инструкций способом, удобным для передачи, интерпретации или обработки людьми или автоматическими средствами» [18]. Кроме этого, приведем несколько аргументов.

Во-первых, когда говорят, что обрабатывали информацию, чтобы получить информацию, возникает непонимание: а чем же то, что обрабатывали, отличается от того, что получили в итоге? А когда сказано, что обрабатывали данные, которые без обработки осмыслить затруднительно, чтобы получить информацию, то есть то, что доступно для осмысления, это понятно.

Во-вторых, как было показано выше, в большинстве рассмотренных определений «информации», речь именно о том, что можно осмыслить. Например, термин «сведения» имеет корень «вед» со значением «ведать», «знать»; «неопределенность наших знаний»; «обозначение содержания» также означает осмысление. Уместно здесь привести ещё одно определение информации, данное основоположником американской стратегической разведки бригадным генералом армии США В. Плэттом:

«Информация разведывательная — есть осмысленные сведения, основанные на собранных, оцененных и истолкованных фактах, изложенных таким образом, что ясно видно их значение для решения какой-либо конкретной задачи текущей политики» [19].

В-третьих, в основании пирамиды ситуационной осведомленности [20], лежат именно данные, из которых в результате обработки получают информацию.

Таким образом, в результате рассмотрения оснований для предложенного определения «информации» противоречий с рассмотренными взглядами на это понятие не выявлено.

Заметим, что помимо искажений, вносимых в данные системой копирования, искажения неминуемо возникают на этапе осознания, что определяется невозможностью полного соответствия представлений осознающего с окружающей действительностью.

Теперь необходимо обратиться к последствиям, вытекающим из принятия предложенного определения.

Наиболее чувствительным в этом отношении является федеральный закон, который, напомним, определяет информацию как «Сведения (сообщения, данные) независимо от формы их представления» [2]. Во-первых, заметим, что предлагаемое определение не противоречит определению, данному в законодательстве. Во-вторых, в качестве родового и единственного признака «информации» в федеральном законе приведены синонимы: «сведения», «сообщения», «данные», без раскрытия содержания понятия «информация». В предлагаемом же определении понятие раскрыто: «Информация — это осознанная копия окружающей действительности». Часть существующего законодательного определения «независимо от формы их представления», хотя и не содержит признаков, выделяющих понятие «информация» из окружающей действительности, может быть присоединена к предлагаемому определению в целях устранения сомнений в неочевидных случаях.

Если рассматривать два подхода к определению информации, приведенные в [21], то «функциональный» подход [22] охватывается определением «осознанная» в предлагаемом определении, а «аттрибутивный» [23] — «копия окружающей действительности».

Заключение. Предложенное определение: «Информация — это осознанная копия окружающей действительности» не требует пересмотра существующей системы взглядов, лишь раскрывая понятие «информации» и уточняя его место в окружающей действительности.

Список использованных источников

1. Колин К. К. Структура реальности и феномен информации. // Наука и образование. 2008. № 5. С. 56 — 61.

2. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» (последняя редакция). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61798/?ysclid=mng2lb7p6c37305089 (дата обращения: 01.04.2026).

3. ГОСТ Р 7.0.107-2022. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиотечно-информационная деятельность. Термины и определения.

4. Толковый словарь русского языка Ожегова. URL: https://slovarozhegova.ru/ (дата обращения: 01.04.2026).

5. Стандарт ISO 5127:2017. Информация и документация. Основные положения и словарь.

6. Большой толковый словарь русского языка. URL: https://gramota.ru/poisk?query=%D0%B8%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F&mode=slovari&dicts[]=42&ysclid=mng2dnc5s0760694468 (дата обращения: 01.04.2026).

7. Философские проблемы кибернетики и информатики. Философские проблемы инженерной деятельности и творчества. URL: https://spbti.ru/public/userfiles/images/158/materil_dop/lekcii/023__12_____.pdf (дата обращения: 16.04.2026).

8. ГОСТ 33707-2016 (ISO/IEC 2382:2015). Межгосударственный стандарт. Информационные технологии. Словарь. № 4.457. URL:

https://docs.cntd.ru/document/1200139532?ysclid=mnhq28hjz0931839558 (дата обращения: 02.04.2026).
9. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. М.: Физматлит, 1960. 392 с.
10. Большой толковый словарь русского языка: А-Я. СПб.: Норинт, 1998. 1534 с.
11. Большой толковый словарь русских существительных: свыше 15 000 имен существительных, идеографическое описание, синонимы, антонимы. М.: АСТ-Пресс Книга, 2005. 862 с.
12. Большая советская энциклопедия. URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/98328/%D0%9A%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F?ysclid=mmt6j0nc70162038992 (дата обращения: 16.03.2026).
13. ГОСТ Р 7.0.8-2025. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Делопроизводство и архивное дело. Термины и определения. № 25.
14. Словарь иностранных слов русского языка. / Сост. Егорова Т. В. М.: Аделант, 2014. 799 с.
15. Абрамов Н. (Переферкович Н. А.) Словарь русских синонимов и сходных по смыслу выражений: около 5000 синонимических рядов, более 20 000 синонимов. М.: Русские словари, 2008. 667 с. Толковый словарь Ушакова. URL: https://ushakovdictionary.ru/word.php?wordid=25091 (дата обращения: 31.03.2026).
16. Шавенько Н. К. Основы теории информации. Учебное пособие. М.: Изд-во МИИГАиК, 2019. 135 с.
17. Информатика. Базовый курс. 2-е издание / Под ред. С. В. Симоновича. СПб.: Питер, 2005. 640 с. URL: https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org_structura/library/resurvsy/pervokursnik/irit/inform/osnovn/1.pdf?ysclid=mpprnbcw3p89182353 (дата обращения: 28.05.2026).
18. Стандарт ISO/IEC/IEEE 24765:2010. Разработка систем и программного обеспечения. Словарь. URL: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec-ieee:24765:ed-1:v1:en (дата обращения: 07.04.2026).
19. Плэтт В. Информационная работа стратегической разведки: Основные принципы. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 341 с.
20. Якушев Д. И., Жидков Д.Н. Компьютерная разведка: учебное пособие. СПб.: Изд-во СПб ун-та МВД России, 2023. 92 с.
21. Юсупов Р. М. К семидесятилетию отечественной информатики // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18, № 1. С. 5—29.
22. Моисеев Н. Н. Человек и ноосфера. М.: Молодая гвардия, 1990. 351 с.
23. Гуревич И. М. Урсул А. Д. Информация — всеобщее свойство материи. Характеристики, оценки, ограничения, следствия. М.: УРСС, 2013. 312 с.

References

1. Kolin K. K. Struktura real`nosti i fenomen informacii = The structure of reality and the phenomenon of information. Nauka i obrazovanie = Science and education. 2008; 5: (56 — 61) p. (In Russ.).
2. Federal`ny`j zakon ot 27.07.2006 № 149-FZ Ob informacii, informacionny`h tehnologiyah i o zashhite informacii (poslednyaya redakciya). (In Russ.). Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61798/?ysclid=mng2lb7p6c37305089 (accessed on: 01.04.2026).
3. GOST R 7.0.107-2022. Sistema standartov po informacii, bibliotechnomu i izdatel`skomu delu. Bibliotechno-informacionnaya deyatel`nost`. Terminy` i opredeleniya = A system of standards for information, librarianship, and publishing. Library and information activities. Terms and definitions. (In Russ.).

4. Tolkovy`j slovar` russkogo yazy`ka Ozhegova = Explanatory dictionary of the Russian language by Ozhegov. Available at: https://slovarozhegova.ru/ (accessed on: 01.04.2026). (In Russ.).
5. Standart ISO 5127:2017. Informaciya i dokumentaciya. Osnovny`e polozheniya i slovar` = Information and documentation — Foundation and vocabulary. (In Russ.).
6. Bol`shoj tolkovy`j slovar` russkogo yazy`ka = A large explanatory dictionary of the Russian language. Available at: https://gramota.ru/poisk?query=%D0%B8%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F&mode=slovari&dicts[]=42&ysclid=mng2dnc5s0760694468 (accessed on: 01.04.2026). (In Russ.).
7. Filosofskie problemy` kibernetiki i informatiki. Filosofskie problemy` inzhenernoj deyatel`nosti i tvorchestva = Philosophical problems of cybernetics and computer science. Philosophical problems of engineering and creativity. Available at: https://spbti.ru/public/userfiles/images/158/materil_dop/lekcii/023__12_____.pdf (accessed on: 16.04.2026). (In Russ.).
8. GOST 33707-2016 (ISO/IEC 2382:2015). Mezhgosudarstvenny`j standart. Informacionny`e tehnologii. Slovar` = The interstate standard. Information technology. Dictionary. № 4.457. Available at: https://docs.cntd.ru/document/1200139532?ysclid=mnhq28hjz0931839558 (accessed on: 02.04.2026). (In Russ.).
9. Brillyue`n L. Nauka i teoriya informacii = Science and information theory. M.: Fizmatlit, 1960: 392 p. (In Russ.).
10. Bol`shoj tolkovy`j slovar` russkogo yazy`ka: A-Ya. St. Petersburg: Norint, 1998: 1534 p. (In Russ.).
11. Bol`shoj tolkovy`j slovar` russkih sushhestvitel`ny`h: svy`she 15 000 imen sushhestvitel`ny`h, ideograficheskoe opisanie, sinonimy`, antonimy` A large explanatory dictionary of Russian nouns: over 15,000 noun names, ideographic description, synonyms, antonyms. M.: AST-Press Kniga, 2005: 862 p. (In Russ.).
12. Bol`shaya sovetskaya e`nciklopediya = The Great Soviet Encyclopedia. Available at: https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/98328/%D0%9A%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F?ysclid=mmt6j0nc70162038992 (accessed on: 16.03.2026). (In Russ.).
13. GOST R 7.0.8-2025. Sistema standartov po informacii, bibliotechnomu i izdatel`skomu delu. Deloproizvodstvo i arhivnoe delo. Terminy` i opredeleniya = A system of standards for information, librarianship, and publishing. Record keeping and archiving. Terms and definitions. № 25. (In Russ.).
14. Slovar` inostranny`h slov russkogo yazy`ka = Dictionary of foreign words of the Russian language. M.: Adelant, 2014: 799 p. (In Russ.).
15. Abramov N. (Pereferkovich N. A.) Slovar` russkih sinonimov i shodny`h po smy`slu vy`razhenij: okolo 5000 sinonimicheskih ryadov, bolee 20 000 sinonimov = Dictionary of Russian synonyms and similar expressions: about 5,000 synonymous series, more than 20,000 synonyms. M.: Russkie slovari, 2008: 667 p. Tolkovy`j slovar` Ushakova = Ushakov's Explanatory Dictionary. Available at: https://ushakovdictionary.ru/word.php?wordid=25091 (accessed on: 31.03.2026). (In Russ.).
16. Shaven`ko N. K. Osnovy` teorii informacii. Uchebnoe posobie = Fundamentals of information theory. Training manual. M.: Izd-vo MIIGAiK, 2019: 135 p. (In Russ.).
17. Informatika. Bazovy`j kurs = Computer science. Basic course. St. Petersburg: Piter, 2005: 640 p. Available at: https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org_structura/library/resurvsy/pervokursnik/irit/inform/osnovn/1.pdf?ysclid=mpprnbcw3p89182353 (accessed on: 28.05.2026). (In Russ.).

18. Standart ISO/IEC/IEEE 24765:2010. Razrabotka sistem i programmnogo obespecheniya. Slovar` = Systems and software engineering — Vocabulary. Available at: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec-ieee:24765:ed-1:v1:en (accessed on: 07.04.2026).
19. Ple`tt V. Informacionnaya rabota strategicheskoj razvedki: Osnovny`e principy` = Information work of strategic intelligence: Basic principles. M.: Izd-vo inostr. lit., 1958: 341 p. (In Russ.).
20. Yakushev D. I., Zhidkov D.N. Komp`yuternaya razvedka: uchebnoe posobie = Computer intelligence: a training manual. St. Petersburg: Izd-vo SPb un-ta MVD Rossii, 2023: 92 p. (In Russ.).
21. Yusupov R. M. K semidesyatiletiyu otechestvennoj informatiki = On the seventieth anniversary of Russian computer science. Trudy` SPIIRAN. 2019. T. 18, № 1: P. 5—29. (In Russ.).
22. Moiseev N. N. Chelovek i noosfera = Man and the noosphere. M.: Molodaya gvardiya, 1990: 351 p. (In Russ.).
23. Gurevich I. M. Ursul A. D. Informaciya — vseobshhee svojstvo materii. Harakteristiki, ocenki, ogranicheniya, sledstviya = Information is a universal property of matter. Characteristics, estimates, limitations, consequences. M.: URSS, 2013: 312 p. (In Russ.).

Information in the geodata structure: the property of conscious representation of the surrounding reality

Yakushev Denis I.
D.Sc. (technics) Professor,
Department of Information security,
Saint Petersburg University of the Ministry of internal Affairs of the Russian Federation
E-mail: d.i.ya@yandex.ru

© Якушев Д.И., 2026

УДК 528.8:630

Герасимова А.К.

ОЦЕНКА МОДЕЛЕЙ ГЕНЕРАТИВНОГО ИСКУСТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕЩЕСТВ КОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРЫ

Герасимова Анна Константиновна
Магистрант 1 курса
Кафедра прикладной физики и математики
ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»
Санкт-Петербург
E-mail: gerasimovaa.gerasimova@yandex.ru

Аннотация. *В обзоре описаны и систематизированы современные подходы генеративного искусственного интеллекта к проектированию кристаллических структур, являющихся основой для создания композитных материалов. Рассмотрена эволюция математического аппарата от базовой диффузии к физически ограниченной генерации и многокритериальному обучению с подкреплением моделей. Проведён сравнительный анализ моделей DiffCSP, CrystalFlow, CrysVCD и MatInvent по критериям скорости генерации, соблюдения симметрии, учёта валентности, термодинамической стабильности и возможности многокритериальной оптимизации. Уделено внимание физически обоснованным ограничениям, проблеме синтезируемости и оценке потенциальных возможностей экспериментальных конфигураций. Приведены данные о российских и зарубежных исследованиях, коммерческих разработках и прогнозах рынка.*

Ключевые слова*: генеративный искусственный интеллект, композитные материалы, кристаллические структуры, диффузионные модели, потоковые сети, обучение с подкреплением, обратное проектирование*

EVALUATION OF AI GENERATIVE MODELS FOR COMPOSITE-STRUCTURE SUBSTANCES

Abstract. The review describes and systematizes modern generative artificial intelligence approaches to the design of crystal structures, which serve as the basis for creating composite materials. The evolution of the mathematical apparatus from basic diffusion to physically constrained generation and multi-objective reinforcement learning of models is considered. A comparative analysis of the DiffCSP, CrystalFlow, CrysVCD, and MatInvent models is carried out according to the criteria of generation speed, symmetry preservation, valence accounting, thermodynamic stability, and multi-objective optimization capability. Attention is paid to physically grounded constraints, the problem of synthesizability, and assessment of the potential capabilities of experimental configurations. Data on Russian and international research, commercial developments, and market forecasts are presented.

Keywords: generative artificial intelligence, composite materials, crystal structures, diffusion models, flow-based models, reinforcement learning, inverse design.

Введение. Развитие генеративного искусственного интеллекта (ИИ) в последние годы существенно трансформировало методологию проектирования материалов. Традиционные подходы

к открытию новых соединений, основанные на последовательном синтезе и экспериментальной верификации, характеризуются значительными временными и финансовыми издержками.

ИИ демонстрирует очевидное преимущество, чем иные процессы, применяемые до этого. Так как возможности времени генерации одной структуры в данный момент доходит до долей секунды, что невероятно превосходит возможности человека по анализу данных. Традиционные подходы, включая рентгеноструктурный анализ и классические алгоритмы CSP (Crystal Structure Prediction - предсказание кристаллической структуры), обеспечивают высокую точность, однако их применение ограничено временными и ресурсными затратами, особенно при работе с трудносинтезируемыми соединениями [1]. Под трудносинтезируемыми соединениями понимаются метастабильные фазы, фазы высокого давления, многокомпонентные и многокатионные составы, соединения, требующие экстремальных температур или давления, а также материалы, которые сложно получить в чистом виде или с заданной кристаллической структурой. Следствием этого является ограниченность экспериментально освоенного пространства материалов: если накопленные за десятилетия исследования подтвердили стабильность порядка 20 000 кристаллов, то вычислительные инициативы вроде Materials Project увеличили этот показатель лишь до 48 000 — величины, всё ещё несопоставимой с теоретическим объёмом неорганических соединений [2].

Кроме того, значительная доля сгенерированных структур оказывается физически невозможной — с нарушенными связями, неустойчивыми фононными спектрами или условиями получения, недостижимыми в стандартных лабораториях [7, 14]. Эффективность проектирования композитов напрямую зависит от способности модели отфильтровывать подобные артефакты ещё на этапе генерации, минимизируя затратный пост-скрининг. Подавляющее большинство стабильных кристаллических фаз остаётся неоткрытым, что характеризует принципиальный интерес к данной области.

Актуальность. Экономические прогнозы подтверждают актуальность тематики. Глобальный рынок генеративного ИИ в сфере открытия материалов в 2024 году оценивался в 536,4 млн долларов США, а к 2034 году, по прогнозам, достигнет 5,58 млрд, что соответствует среднегодовому темпу роста в 26,4 %. При этом сегмент генеративного ИИ, по оценкам, уже к 2034 году может вырасти до 11,7 млрд долларов [15].

За указанными показателями — не только фундаментальные задачи материаловедения, но и прямые запросы от авиастроения, энергетического машиностроения, биомедицинских имплантатов и микроэлектроники — отраслей, где цена ошибочного выбора материала измеряется долговечностью изделия, а иногда и безопасностью.

Сейчас сгенерированные кристаллы используются для создания аккумуляторов нового поколения (Solid-State), солнечных панелей, сверхпроводников и полупроводниковых чипов. Так, модель Chemeleon опублиткованная в журнале Nature Communications в 2025 успешно предсказала стабильные фазы в четвертичной системе Li–P–S–Cl, имеющей прямое отношение к твердотельным электролитам для литий-ионных аккумуляторов [17]. В полупроводниковой отрасли CrysVCD (2025) обеспечил генерацию кандидатов с высокой теплопроводностью и высоким значением диэлектрической проницаемости (high-к), что критично для чипов нового поколения [18]. Инструмент SCIGEN (MIT, 2025) ориентирован на ускоренный поиск материалов для солнечных панелей, чипов и высокоэффективных батарей [19].

В свою очередь переход от вычислительной гипотезы к реальному материалу сопряжён с рядом принципиальных трудностей. Генеративные модели нередко формируют структуры, визуально корректные, но физически нереализуемые — с нарушением валентностей или условиями синтеза (рис.1.).



Рисунок 1. Примеры с нарушением валентностей или условиями синтеза.

Figure 1. Examples of valence violations or synthesis conditions.

Генерация структуры является лишь одним из этапов, после которого необходимо провести проверку термодинамической стабильности, оценку кинетики кристаллизации и экспериментальную верификацию.

Данный обзор ставит цель систематизировать современные подходы к генерации веществ композитной структуры средствами ИИ, оценить их достоинства и ограничения, а также обозначить векторы дальнейшего развития. Рассматриваются генеративные архитектуры последовательных поколений; анализируется эволюция их математического аппарата — от диффузионных моделей через потоковые сети к физически ограниченной генерации и обучению с подкреплением; обсуждаются перспективы их интеграции в гибридный конвейер проектирования композитных материалов.

Обзор предметной области. В нашем исследовании будут рассмотрены четыре перспективные модели, генерирующие кристаллические структуры: DiffCSP, CrystalFlow, CrysVCD и MatInvent. (рис.2.)



Рисунок 2. Эволюция моделей.

Figure 2. Evolution of models.

В отличие от классических инструментов масштабного скрининга (например, GNoME от DeepMind [2]), где используется система грубого перебора миллионов вариантов графовыми сетями, представленные четыре модели работают по принципу глубокого обратного дизайна, учитывая физику и химию материала на уровне элементарной ячейки. Важно подчеркнуть, что все четыре архитектуры оперируют периодическими граничными условиями и не моделируют межфазные границы непосредственно. Тем не менее, именно качество сгенерированной кристаллической фазы — её симметрия, стабильность и химическая валидность — определяет возможность её дальнейшего использования в качестве армирующего наполнителя или матрицы композита. В этом смысле генеративное проектирование кристаллических фаз на атомарном уровне является фундаментальным звеном для создания композитных материалов. Следует также отметить, что между рассмотренными моделями существует прямая преемственность: CrystalFlow явно заимствует фреймворк данных и структуру экспериментов из DiffCSP [8], CrysVCD конструируется как модульный плагин, совместимый с диффузионными генераторами [14], а MatInvent использует предобученную диффузионную модель в качестве базового агента для RL [13]. Такая модульность свидетельствует о созревании экосистемы: отдельные компоненты (симметрийный генератор, химический фильтр, оптимизатор свойств) начинают комбинироваться в гибкие конвейеры, аналогичные тем, что уже существуют в области молекулярного дизайна.



Рисунок 3. Архитектура исследовательского процесса.

Figure 3. Architecture of the research process.

Процесс генерации кристаллов в рассматриваемых моделях выглядит следующим образом. DiffCSP и CrystalFlow решают одну и ту же задачу — генерацию 3D-решёток кристаллов, но используют принципиально разную математику (диффузия против Flow Matching). Это классический пример технологической эволюции «быстрее и точнее». Чтобы спроектировать сверхпрочный сплав или твёрдый электролит, необходимо сначала рассчитать структуру стабильных микрокристаллов, которые впоследствии станут матрицей или наполнителем композита. Логика исследовательского процесса, применённого в настоящем обзоре, построена по схеме, представленной на рис. 3: последовательный анализ математического аппарата, симметрийных свойств и химической

валидности каждой модели → выделение унифицированных критериев сравнения (скорость, соблюдение симметрии, учёт валентности, термодинамическая стабильность, многокритериальная оптимизация) → количественное и качественное сравнение → выводы об инженерной применимости в проектировании композитов.

Рассмотрим 4 модели:

Модель 1. DiffCSP. Первая из рассматриваемых систем, представленная в 2023 году, фактически положила начало современной волне генеративного формирования кристаллических структур. Её архитектура строится на совместной диффузии параметров решётки и атомных позиций, однако главный вклад авторов модели — исследователей из Университета Цинхуа (Jiao et al., 2023) [7] — не столько сам механизм деноизинга (от англ. denoising — последовательное удаление шума из зашумлённых данных), сколько способ учёта периодичности. Отказ от декартовых координат в пользу дробных координат внутри элементарной ячейки, дополненных обернутым нормальным распределением (вероятностное распределение для циклических величин, учитывающее замкнутость координат внутри ячейки), позволило избежать артефактов на границах ячейки, неизбежных при прямолинейном переносе компьютерного зрения на кристаллографию.

Вместе с тем это решение обеспечило теоретически строгую E(3)-эквивариантность относительно поворотов, переносов и отражений — условие, без которого генерация периодических систем теряет физический смысл. Обучение на 45 тысячах структур из набора данных MP-20 (Materials Project, 20 типов элементов) показало долю совпадений 85,7 % на тестовой выборке [4, 7]; при вычислительных затратах на порядок ниже классических эволюционных алгоритмов вроде USPEX такая точность выглядит вполне конкурентоспособно. Однако у этой модели есть своя цена — низкая скорость. Чтобы получить одну структуру, нужно от ста до тысячи последовательных шагов очистки от шума, поэтому при массовом отборе кандидатов DiffCSP становится самым медленным звеном всего конвейера. Не менее серьёзный, хотя и менее заметный на первый взгляд, недостаток — отсутствие явных химических ограничений [7, 14]. Атомы размещаются по чисто математическим законам, без учёта валентности, и в итоге нередко получаются конфигурации, которые ни одна реальная химическая реакция воспроизвести не способна: например, атом углерода может оказаться связанным с пятью соседями вместо четырёх, или в структуре возникают связи между элементами, которые на практике друг с другом не соединяются.

Модель 2. CrystalFlow. Логичным развитием диффузионного подхода стала потоковая модель, предложенная в 2024 году Стэнфордским университетом (Stanford) и Массачусетским технологическим институтом (MIT). [8] Здесь дискретный процесс денойзинга (процесса удаления шума из данных) заменён непрерывным преобразованием простого распределения в целевое посредством обыкновенных дифференциальных уравнений — архитектура Continuous Normalizing Flows в сочетании с Conditional Flow Matching. Интересна сама конструкция: графовые нейронные сети, учитывающие эквивариантность (согласованность при поворотах и переносах), обрабатывают атомные координаты, а параметры решётки задаются через полярное разложение — это делает их инвариантными к ориентации в пространстве. Генерация всех компонентов структуры происходит одновременно, а для получения образца достаточно обычного решателя дифференциальных уравнений (ODE-интегратора), которому хватает 10–50 шагов — в десять раз меньше, чем у диффузионных моделей [8]. Время генерации одной структуры падает с минут до долей секунды, при этом точность совпадений держится около 82 %. Разница с DiffCSP в 3,7 процентных пункта, с точки зрения задач массового скрининга, вполне приемлема: незначительная потеря в абсолютной точности окупается выигрышем в пропускной способности. CrystalFlow, занимает иную нишу — не высокоточное предсказание отдельной структуры, а быстрый перебор огромных химических пространств, где скорость важнее последнего процента точности.

Модель является быстрым генератором перебора кандидатных фаз для матрицы или наполнителя композита — там, где важнее пропускная способность, чем последний процент точности. Он не заменяет CrysVCD (химическая фильтрация) и MatInvent (многокритериальная оптимизация), а дополняет их на раннем этапе генерации.

CrystalFlow существует как исследовательский фреймворк с открытым кодом, доступный для академического использования. Архитектура разработана и опубликована, но пока не применяется в реальном промышленном проектировании композитов — это перспективный инструмент, чья практическая ценность раскроется только в составе гибридного конвейера.

Модель 3. CrysVCD. Перспективная модель, опубликованная в 2025 году Массачусетским технологическим институтом (MIT) в США, знаменует собой принципиальный сдвиг от математической корректности к физической реализуемости. Это по-прежнему диффузионная архитектура, но с коренным отличием в устройстве самого процесса генерации: на каждом шаге денойзинга работает жёсткий фильтр химической валентности. Если в базовых моделях, включая DiffCSP, атомы распределяются в пространстве по геометрическим алгоритмам, и химическая корректность возникает лишь как случайный побочный эффект, то здесь правила валентности встроены в динамику диффузии. Невозможные связи отсекаются ещё в процессе генерации, а не выявляются затем дорогостоящим пост-скринингом (процессом фильтрации и упорядочивания). Доля термодинамически стабильных структур достигает 85 %, фононной стабильности — 68 %. На практике это означает, что объём последующей DFT-проверки сокращается в разы, а сами кандидаты впервые становятся не просто математически корректными, но и по-настоящему синтезируемыми [14].

Модель 4. MatInvent. Представленный в 2025 году Федеральной политехнической школой Лозанны, Швейцария (EPFL), этот методологический аппарат решает уже не столько задачу генерации с нуля, сколько проблему инженерной применимости результатов. Это не самостоятельный генератор, а надстройка на базе обучения с подкреплением, управляющая диффузионной моделью в режиме целевой инверсной генерации (генерации под наперёд заданный набор свойств, а не предсказания свойств по известной структуре) . Главная трудность проектирования композитов — внутренний конфликт свойств: материал должен быть одновременно прочным и лёгким, теплопроводным и электроизоляционным. Классический скрининг в таких условиях работает методом грубой силы. MatInvent же встраивает многокритериальную Pareto-оптимизацию непосредственно в диффузионный процесс, направляя генерацию так, чтобы выходное вещество удовлетворяло одновременно пяти-шести полярным физико-химическим требованиям. Достаточно 60 итераций, чтобы получить структуру с нужным балансом свойств, при этом вычислительная нагрузка на последующую симуляцию падает в 378 раз по сравнению с традиционным перебором [13]. Зависимость от базовой диффузионной архитектуры — неизбежное ограничение: без неё модели просто нечего регулировать. Однако как инструмент управления генеративным процессом в условиях жёстких многокритериальных ограничений MatInvent, по сути, не имеет аналогов.

Главные точки для сравнения моделей: базовая математика, учет физических и химических законов, скорость генерации, соблюдение симметрии, умение генерировать структуры с учетом внешних термодинамических факторов.

Таблица 1. Концептуальное сравнение моделей

Table 1. Conceptual comparison of models

Критерий оценки	DiffCSP (Базовая)	CrystalFlow (Эволюция)	CrysVCD (Физика)	MatInvent (Инженерия)
Базовая математика	Диффузия (Denoising)	Flow Matching (Потоки)	Диффузия + Valence Constraints	Diffusion + Reinforcement Learning
Учет законов физики/химии	Слабый (только пространственная симметрия)	Умеренный (учет внешних термодинамических условий)	Максимальный (строгий контроль валентности связей)	Высокий (подстройка под финальные физические свойства)
Целевой фокус	Поиск принципиально новых геометрий решеток	Быстрый скрининг больших массивов фаз	Генерация гарантированно стабильных веществ	Инверсный дизайн под жесткие ТЗ заказчика (многокритериальность)
Формат на выходе и полнота структуры	Предсказывает 3D-координаты атомов для **строго фиксированного** состава.	Генерирует **полную 3D-матрицу решетки** и координаты при заданном давлении.	Выдает **и формулу, и структуру.** На выходе готовый химически валидный кристалл.	Выдает структуру, **оптимизированную под макросвойства** (с префиксом нужных характеристик).



Рисунок 4. Радарная диаграмма многокритериального профиля моделей

Figure 4. Radar chart of the multi-criteria profile of models.

Для наглядного представления результатов сравнения построены радарная диаграмма многокритериального профиля моделей (рис. 4) и комплексный график инженерно-физических характеристик (рис. 5). Радарная диаграмма (рис. 4) демонстрирует компромиссный характер современных архитектур: DiffCSP доминирует по точности (Match Rate), CrystalFlow — по скорости, CrysVCD — по физико-химической валидности, а MatInvent — по способности к многокритериальной оптимизации. Ни одна модель не достигает максимума по всем осям одновременно, что указывает на перспективность гибридных конвейеров, объединяющих сильные стороны разных подходов.

Проведено сравнение моделей по скорости генерации композитных структур:

Таблица 2. Сравнение моделей по скорости генерации структур.

Table 2. Comparison of models by structure generation speed

Модель	**Время на одну структуру (секунд)**	**Скорость пакета (1000 шт.)**	**Роль скорости в задаче**
DiffCSP	0,36-1,94	~6–9 минут	Стандартный рабочий темп для предсказания структуры
CrystalFlow	**0,04-0,13**	~40 секунд	Экстремально быстрый "выхлоп" геометрий
CrysVCD	1,2-1,75	~20–25 минут	Относительно неспешная генерация, компенсируемая 85%-й стабильностью
MatInvent	2,5-5,0	**Не применимо** *(генерирует точечно)*	Долгая единичная генерация, экономящая недели на квантовых расчетах свойств

Комплексный график (рис. 5) показывает, что разброс времени генерации между самой быстрой (CrystalFlow, ~0,09 с) и самой медленной (MatInvent, ~3,75 с) моделями превышает два порядка. При этом CrysVCD обеспечивает рекордную термодинамическую стабильность (85 %) при умеренных временных затратах (~1,5 с), что делает её оптимальным выбором для задач, где приоритетом является синтезируемость, а не пропускная способность.

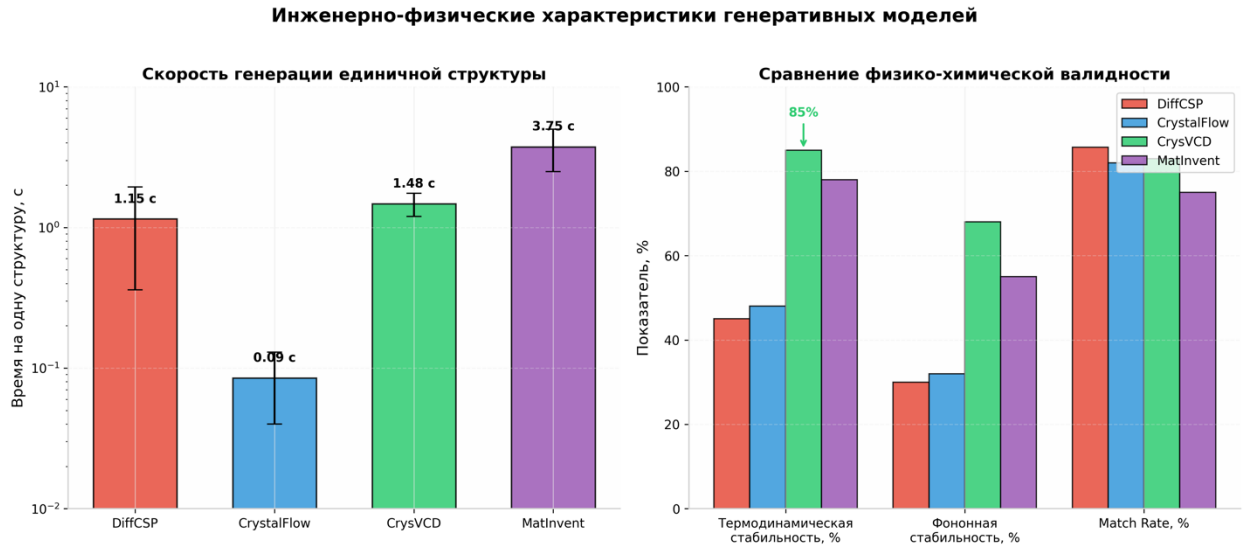


Рисунок 5. График инженерно-физических характеристик

Figure 5. Graph of engineering and physical characteristics.

Далее будет рассмотрена инженерная применимость в проектировании композитов:

Таблица 3. Инженерная применимость в проектировании композитов

Table 3. Engineering applicability in composite design

Критерий	DiffCSP	CrystalFlow	CrysVCD	MatInvent
Инверсный дизайн (генерация под заданные свойства)	Нет	Нет	Нет	Да (Pareto-оптимизация по 5–6 критериям)
Целевая генерация (заданный химический состав)	Возможна через условную диффузию	Возможна через условное Flow Matching	Возможна с учётом валентности	Целевая оптимизация по свойствам
Роль в конвейере проектирования композита	Генерация кандидатов-«первопроходцев»	Массовый скрининг фаз для матрицы/наполнителя	Фильтрация химически корректных кандидатов	Многокритериальная оптимизация под эксплуатационные требования
Учёт межфазных границ	Нет (периодическая ячейка)	Нет (периодическая ячейка)	Нет (периодическая ячейка)	Нет (периодическая ячейка)
Ключевое ограничение для композитов	Низкая доля стабильных фаз; низкая скорость	Отсутствие химических ограничений; умеренная точность	Отсутствие многокритериальной оптимизации	Зависимость от качества базовой генеративной модели; риск оптимизации в невалидной области

Перейдём от статистических показателей точности к вопросу практического использования рассмотренных моделей. Композиты предъявляют специфические требования: воспроизводить кристаллические структуры отдельных фаз, свойства матрицы и наполнителя, обеспечивать возможность многокритериальной оптимизации – по механической прочности, теплопроводности, диэлектрической проницаемости и другим параметрам.

В таблице систематизированы возможности каждой модели с позиции такого инженерного применения (табл.3).

Главное различие между архитектурами заключается в наличии инверсного дизайна – способности генерировать структуры под заранее заданный набор свойств. Среди рассмотренных подходов только MatInvent реализует такую возможность, используя Парето-оптимизацию по нескольким целевым функциям. Остальные модели (DiffCSP, CrystalFlow, CrysVCD) ориентированы на воспроизведение распределения известных кристаллических структур и не предназначены для прямой оптимизации эксплуатационных характеристик.

Функциональное разделение моделей в гипотетическом конвейере проектирования выглядит следующим образом: DiffCSP может использоваться на начальном этапе для генерации широкого набора кристаллических каркасов, которые служат отправной точкой для дальнейшего отбора. CrystalFlow, благодаря высокой вычислительной эффективности (10–50 шагов

интегрирования), пригоден для массового скрининга кандидатных фаз, например, при подборе материала матрицы или наполнителя. CrysVCD выполняет роль химического фильтра: он отсеивает структуры с несбалансированной валентностью и низкой термодинамической стабильностью, повышая таким образом долю реализуемых на практике кандидатов. MatInvent замыкает цепочку, обеспечивая финальную настройку свойств под конкретные технические требования с использованием обучения с подкреплением.

Важно отметить общее для всех архитектур ограничение: все они оперируют только с идеальными периодическими кристаллическими решётками и не учитывают межфазные границы – поверхности раздела между матрицей и наполнителем. Морфология границ, дефекты и адгезионные свойства, которые во многом определяют прочность и долговечность композита, остаются вне области моделирования. Это требует привлечения дополнительных методов (например, молекулярной динамики или конечно-элементного анализа) на последующих этапах проектирования.

Каждая модель имеет и свои частные недостатки: DiffCSP демонстрирует сравнительно низкую долю стабильных фаз и значительное время генерации; CrystalFlow не контролирует химическую валентность, что может приводить к появлению нереализуемых составов; CrysVCD не предусматривает многокритериальной оптимизации; MatInvent, в свою очередь, чувствителен к качеству исходной генеративной модели и может давать физически некорректные решения при недостаточной обучающей выборке.

Можно сделать вывод, что ни одна из рассмотренных архитектур не является универсальным решением. Наиболее рациональной представляется гибридная стратегия. Однако для полноценного учёта межфазных взаимодействий необходима разработка новых подходов, выходящих за рамки периодических моделей, – это становится одной из первоочередных задач в области генеративного дизайна композитов.

Российские разработки. Российская наука в области ИИ для материаловедения находится на более раннем этапе, но располагает рядом сильных позиций. В РХТУ им. Д.И. Менделеева ведутся исследования по применению обучения с подкреплением и контролируемого обучения для оптимизации производства полимерных композиционных материалов. Работы направлены на предсказание реологических свойств смесей, оптимизацию режимов вулканизации и подбор составов с заданными характеристиками [10].

Лаборатория академика В.П. Ананикова в Институте органической химии имени Н.Д. Зелинского РАН развивает методы машинного обучения для анализа масс-спектрометрических данных и предсказания разрушения материалов под действием агрессивных сред. Указанные подходы имеют прямое отношение к проектированию композитов с повышенной коррозионной стойкостью [11].

Разрабатывается первая в мире информационная система на базе искусственного интеллекта, предназначенная для ускоренного проектирования изделий из полимерных композитных материалов. Разработку ведёт Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» при МГТУ им. Н.Э. Баумана. Платформа позволит инженерам без специализированного опыта в области композитов разрабатывать высокопрочные и лёгкие конструкции, в частности — для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Система в цифровом формате подбирает оптимальные композитные материалы под заданные условия эксплуатации, моделирует их поведение под нагрузками и оценивает прочность и долговечность будущих изделий. [16]

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (СПбГУПТД) специализируется на углерод-углеродных композитах для термозащиты аэрокосмической техники и элементов водородной энергетики. Машинное обучение применяется

для моделирования процессов пиролиза и карбонизации, определяющих микроструктуру и свойства конечного продукта [12].

Заключение. На основании выполненного анализа сформулирован ряд закономерностей, имеющих принципиальное значение как для верификации теоретических моделей, так и для практического внедрения генеративных архитектур в области синтеза и прогнозирования свойств.

Современное материаловедение находится на пороге качественного сдвига. Генеративный ИИ не заменит химика или материаловеда, но станет его мощнейшим инструментом — аналогично тому, каким в своё время стали спектрометрия или электронная микроскопия. Композитные материалы, обладающие многомасштабной организацией, представляют собой идеальный объект для применения в области технологий. Ключ к успеху заключается в интеграции физической корректности, мультимодальности и замкнутого экспериментального цикла.

Для российской науки и промышленности тема приобретает дополнительную актуальность в контексте импортозамещения и технологического суверенитета. Международные модели не содержат достаточного объёма структурированной информации о полимерных матрицах, отечественных видах углеродного волокна и специфических связующих системах [8]. Для этого требуется формирование национальных репозиториев данных о композитах/ Разработка физически информированных генеративных архитектур, адаптированных к многофазным материалам, которые представляют собой приоритетное направление, определяющее конкурентоспособность отечественного материаловедения в среднесрочной перспективе.

В дальнейших исследованиях планируется провести тестирование на обработку и генерацию результатов формирования кристаллических структур композитных материалов.

Выводы. Сравнительный анализ показывает, что для проектирования композитных материалов наибольший практический интерес представляет гибридный подход, объединяющий скорость CrystalFlow на этапе массового скрининга, химическую валидность CrysVCD на этапе фильтрации кандидатов и многокритериальную оптимизацию MatInvent на финальном этапе подбора фаз с целевыми свойствами. DiffCSP сохраняет значение как высокоточный baseline для верификации отдельных структур, особенно в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, когда критична точность предсказания решётки, а не пропускная способность.

Проведённый анализ показывает, что за 2023–2026 гг. генеративные архитектуры для кристаллических структур эволюционировали от чисто математических диффузионных моделей к физически информированным системам с обратной связью. Основные векторы развития – повышение химической валидности, многокритериальность и радикальное ускорение (с 1000 шагов до 10–50, а для языкового этапа – до 4–5). Наиболее перспективным представляется гибридный подход, комбинирующий быструю генерацию состава (CrysVCD Stage I), потоковую оптимизацию структуры (CrystalFlow) и RL-дообучение под заданные свойства (MatInvent).

Такой конвейер способен не только генерировать стабильные кристаллы, но и целенаправленно проектировать материалы с требуемыми функциональными характеристиками, что открывает новые возможности для ускоренного материаловедения.

Список использованных источников

1. Ament, S. et al. Targeted materials discovery using Bayesian algorithm execution // npj Computational Materials. — 2024. — Vol. 10. — Art. 86. — DOI: 10.1038/s41524-024-01300-7.
2. Merchant, A. et al. Scaling deep learning for materials discovery // Nature. — 2023. — Vol. 624. — P. 80–85. — DOI: 10.1038/s41586-023-06735-9.
3. Sun, W. et al. CSPBench: a benchmark and critical evaluation of Crystal Structure Prediction // arXiv:2407.00733. — 2024.

4. Jain, A. et al. Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation // APL Materials. — 2013. — Vol. 1, № 1. — Art. 011002. — DOI: 10.1063/1.4812323.
5. Schütt, K.T. et al. SchNet: A continuous-filter convolutional neural network for modeling quantum interactions // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2017. — Vol. 30. — P. 991–1001.
6. Xie, T. et al. Crystal Diffusion Variational Autoencoder for Periodic Material Generation // International Conference on Learning Representations (ICLR). — 2022. — arXiv:2110.06197.
7. Jiao, R. et al. Crystal Structure Prediction by Joint Equivariant Diffusion // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2023. — Vol. 36. — arXiv:2309.04475.
8. Luo, X. et al. CrystalFlow: a flow-based generative model for crystalline materials // Nature Communications. — 2025. — Vol. 16. — Art. 64364. — DOI: 10.1038/s41467-025-64364-5.
9. Кулемза, Д.С., Копылова, Л.Е. Перспективы применения искусственного интеллекта в производстве полимерных композиционных материалов // Вестник молодёжной науки. — 2023. — № 3. — С. 45–52. — DOI: 10.26404/2023-3-10.
10. Искусственный интеллект (ИИ) в химии / Лаборатория академика В.П. Ананикова ИОХ РАН. — URL: https://ananikovlab.ru/ru/all-researches/AI-in-chemistry (дата обращения: 15.08.2026).
11. Наноинженерия, композиты и биоматериалы / Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. — URL: https://prouniver.ru/programs/nanoengineering (дата обращения: 15.08.2026).
12. Hong, H. et al. A comprehensive review of artificial intelligence applications in composite materials: Predictive, generative, and automation approaches // International Journal of Advanced Materials and Design. — 2025. — Vol. 4, № 8. — DOI: 10.1002/ijamd.20250001.
13. Chen J., Guo J., Schwaller P. Accelerating inverse materials design using generative diffusion models with reinforcement learning // arXiv preprint arXiv:2511.03112. — 2025.
14. Li M., Cheng M., Luo W., Tang H., Yu B., Cheng Y., Xie W., Li J., Kulik H. Enhancing Materials Discovery with Valence Constrained Design in Generative Modeling // arXiv preprint arXiv:2507.19799. — 2025.
15. AI in Materials Discovery Market Size, Share & Trends Analysis Report / Market.us. — 2025. — URL: https://market.us/report/ai-in-materials-discovery-market/ (дата обращения: 15.08.2026).
16. В России создают первую в мире ИИ-платформу для проектирования композитных деталей БПЛА. www1.ru, 2026. URL: https://www1.ru/news/2026/01/21/v-rossii-sozdaiut-pervuiu-v-mire-ii-platformu-dlia-proektirovaniia-kompozitnyx-detalei-bpla.html (дата обращения: 02.09.2026).
17. Park H., Onwuli A., Walsh A. Exploration of crystal chemical space using text-guided generative artificial intelligence // Nature Communications. – 2025. – Vol. 16. – Art. 4379. – DOI: 10.1038/s41467-025-59636-y. – URL: https://www.nature.com/articles/s41467-025-59636-y (дата обращения: 16.08.2026).
18. Cheng M., Luo W., Tang H., Yu B., Cheng Y., Xie W., Li J., Kulik H. J., Li M. Enhancing materials discovery with valence-constrained design in generative modeling // Nature Computational Science. – 2026. – DOI: 10.1038/s43588-026-01037-2. – URL: https://www.nature.com/articles/s43588-026-01037-2 (дата обращения: 16.08.2026).
19. Okabe R., Cheng M., Chotrattanapituk A., Mandal M., Mak K., Córdova Carrizales D., Hung N. T., Fu X., Han B., Wang Y. Structural constraint integration in a generative model for the discovery of quantum materials // Nature Materials. – 2026. – Vol. 25. – P. 223–230. – DOI: 10.1038/s41563-025-02355-y. – URL: https://www.nature.com/articles/s41563-025-02355-y (дата обращения: 16.08.2026).

Reference

1. Ament, S. et al. Targeted materials discovery using Bayesian algorithm execution // npj Computational Materials. — 2024. — Vol. 10. - Art. 86. - DOI: 10.1038/s41524-024-01300-7.
2. Merchant, A. et al. Scaling deep learning for materials discovery // Nature. — 2023. — Vol. 624. - P. 80–85. — DOI: 10.1038/s41586-023-06735-9.
3. Sun, W. et al. CSPBench: a benchmark and critical evaluation of Crystal Structure Prediction // arXiv:2407.00733. — 2024.
4. Jain, A. et al. Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation // APL Materials. — 2013. — Vol. 1, No. 1. - Art. 011002. - DOI: 10.1063/1.4812323.
5. Schütt, K.T. et al. SchNet: A continuous-filter convolutional neural network for modeling quantum interactions // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2017. — Vol. 30. - P. 991–1001.
6. Xie, T. et al. Crystal Diffusion Variational Autoencoder for Periodic Material Generation // International Conference on Learning Representations (ICLR). - 2022. - arXiv:2110.06197.
7. Jiao, R. et al. Crystal Structure Prediction by Joint Equivariant Diffusion // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2023. — Vol. 36. - arXiv:2309.04475.
8. Luo, X. et al. CrystalFlow: a flow-based generative model for crystalline materials // Nature Communications. — 2025. — Vol. 16. — Art. 64364. — DOI: 10.1038/s41467-025-64364-5.
9. Kulemza, D.S., Kopylova, L.E. Prospects for the application of artificial intelligence in the production of polymer composite materials // Bulletin of Youth Science. — 2023. — No. 3. — P. 45–52. — DOI: 10.26404/2023-3-10.
10. Artificial Intelligence (AI) in Chemistry / Laboratory of Academician V.P. Ananikov, Zelinsky Institute of Organic Chemistry (ZIOC) RAS. — URL: https://ananikovlab.ru/ru/all-researches/AI-in-chemistry (accessed: 15.08.2026).
11. Nanoengineering, Composites, and Biomaterials / Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. — URL: https://prouniver.ru/programs/nanoengineering (accessed: 15.08.2026).
12. Hong, H. et al. A comprehensive review of artificial intelligence applications in composite materials: Predictive, generative, and automation approaches // International Journal of Advanced Materials and Design. — 2025. — Vol. 4, No. 8. — DOI: 10.1002/ijamd.20250001.
13. Chen J., Guo J., Schwaller P. Accelerating inverse materials design using generative diffusion models with reinforcement learning // arXiv preprint arXiv:2511.03112. — 2025.
14. Li M., Cheng M., Luo W., Tang H., Yu B., Cheng Y., Xie W., Li J., Kulik H. Enhancing Materials Discovery with Valence Constrained Design in Generative Modeling // arXiv preprint arXiv:2507.19799. — 2025.
15. AI in Materials Discovery Market Size, Share & Trends Analysis Report / Market.us. — 2025. — URL: https://market.us/report/ai-in-materials-discovery-market/ (accessed: 15.08.2026).
16. Russia is creating the world's first AI platform for designing composite UAV parts. www1.ru, 2026. URL: https://www1.ru/news/2026/01/21/v-rossii-sozdaiut-pervuiu-v-mire-ii-platformu-dlia-proektirovaniia-kompozitnyx-detalei-bpla.html (accessed: 02.09.2026).
17. Park H., Onwuli A., Walsh A. Exploration of crystal chemical space using text-guided generative artificial intelligence // Nature Communications. – 2025. – Vol. 16. – Art. 4379. – DOI: 10.1038/s41467-025-59636-y. – URL: https://www.nature.com/articles/s41467-025-59636-y (accessed: 16.08.2026).

18. Cheng M., Luo W., Tang H., Yu B., Cheng Y., Xie W., Li J., Kulik H. J., Li M. Enhancing materials discovery with valence-constrained design in generative modeling // Nature Computational Science. – 2026. – DOI: 10.1038/s43588-026-01037-2. – URL: https://www.nature.com/articles/s43588-026-01037-2 (accessed: 16.08.2026).
19. Okabe R., Cheng M., Chotrattanapituk A., Mandal M., Mak K., Córdova Carrizales D., Hung N. T., Fu X., Han B., Wang Y. Structural constraint integration in a generative model for the discovery of quantum materials // Nature Materials. – 2026. – Vol. 25. – P. 223–230. – DOI: 10.1038/s41563-025-02355-y. – URL: https://www.nature.com/articles/s41563-025-02355-y (access date: 08/16/2026).

РАЗДЕЛ ГЕОЭКОЛОГИЯ

SECTION GEOECOLOGY

УДК 638.12+581.162

Вагизов М.Р., [1]Грязькин А.В., [2]Парамонов С. Г., [1]Шмелёв Г.Б.

ОЦЕНКА СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ПЧЕЛОВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Вагизов Марсель Равильевич
Доктор технических наук, доцент
г. Санкт-Петербург
E-mail: bars-tatarin@yandex.ru

[1]Грязькин Анатолий Васильевич
доктор биологических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
г. Санкт-Петербург
E-mail: lesovod@bk.ru

[3]Парамонов Сергей Геннадиевич
кандидат биологических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет Министерства здравоохранения Российской Федерации
г. Санкт-Петербург
E-mail: sergei.paramonov@pharminnotech.com

[2]Шмелев Глеб Борисович
Аспирант
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
г. Санкт-Петербург
E-mail: g-shmelev@tbs.spb.ru

***Аннотация**: В статье рассматривается технологии применения беспилотных летательных аппаратов для задачи оценки сырьевой базы пчеловодства. Цель работы исследование возможностей применения беспилотных авиационных систем как инструмента для анализа и оценки сырьевой базы пчеловодства. Определение видового состава растений и эффективной методики применения БАС к поставленной задаче, а также оценка* состояния постагрогенных и лесных экосистем на участках обследования.

***Ключевые слова:** беспилотные авиационные системы, пчеловодство, сырьевая база, медоносы*

ASSESSMENT OF THE RAW MATERIAL BASE OF BEEKEEPING USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

***Annotation: This** article examines technologies for using unmanned aerial vehicles (UAVs) to assess the resource base for beekeeping. The objective of the study is to investigate the potential of unmanned aerial systems (UAS) as a tool for analyzing and evaluating the beekeeping resource base. This includes identifying*

plant species composition, determining an effective methodology for applying UAS to this task, and assessing the condition of post-agrogenic and forest ecosystems within the surveyed areas.

Keywords: *unmanned aerial systems, beekeeping, raw material base, honey plants*

Введение. Беспилотные авиационные систем (БАС) – новый, многофункциональный инструмент в руках человека. Взрывное расширение применения беспилотников в России – явление последнего десятилетия [1-2, 6, 8-9, 15-19, 21-23, 33-38]. В разных отраслях беспилотные летательные аппараты (БЛА) используются более трех десятков лет [2, 5, 7, 15, 16-19]. Одним из первых направлений использования БЛА является землеустройство, строительство дорог и других линейных объектов [9, 16, 21, 35, 37]. Важная сфера применения БЛА – мониторинг [6, 21-23, 27, 34, 36] и особенно при охране лесов [22, 27, 33, 38]. Во многих странах БЛА широко используются как в сельском хозяйстве [9, 13-19, 25], так и в лесном хозяйстве [1-8, 10, 17, 22, 23]. Беспилотные летательные аппараты используют даже при оценке смещения грунтов [37].

Использование беспилотных систем в лесном хозяйстве, послужило толчком к расширению и совершенствованию методов получения и обработки объемной разноплановой информации. Сегодня БПЛА успешно внедряются во многие направления лесохозяйственного производства [1-8, 10, 17, 22, 23, 32-36]. Беспилотники необходимы и для оценки ущерба от лесных пожаров, наводнений и других стихийных бедствий [32-36, 38]. С помощью БАС упрощается задача по выявлению очагов энтомовредителей и болезней леса [22, 23, 27, 33]. БАС – эффективный инструмент при инвентаризации лесных культур, оценки их состояния и сохранности [1, 6, 23]. Беспилотники незаменимы при оценке успешности естественного лесовозобновления на удалённых и труднодоступных участках леса [23]. Важнейшее направление использования БВС (Беспилотных воздушных суден) на современном этапе развития лесного комплекса – оценка запасов отдельных видов ресурсов лесного фонда [3, 5, 10].

Разнообразие типов беспилотных систем позволяет выбирать аппараты для выполнения конкретных задач. Даже самые простые квадрокоптеры упрощают и ускоряют выполнение многих видов работ [1, 2, 4, 8, 15, 22]. Для работников многих отраслей БВС – надёжный и эффективный помощник [1, 2, 4, 8, 15, 22].

Цель исследования – оценка сырьевой базы пчеловодства с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Объект и методика. Объект исследования (опытные участки) – участки лесного фонда и заброшенные земли сельскохозяйственного назначения в Гдовском районе Псковской области. С помощью БВС было обследовано три объекта. Общие сведения по объектам исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Общие сведения по объектам исследования

Table 1. General information about the research objects

Номер опытного участка	Географические координаты		Общая площадь опытного участка, га	Категория земель
	северная широта	западная долгота		
1	58^0 45’ 217’’	28^0 21’ 331’’	8.3	Заброшенные земли сельскохозяйственного назначения
2	58^0 27’ 07’’	28^0 12’ 47’’	4.7	Лесной фонд
3	58^0 29’ 42’’	28^0 00’ 59’’	2.4	Лесной фонд

Для получения аэроснимков использован квадракоптер модели DJI Phantom 4 PRO V1.0 и DJI Mavic Air 2S. Технические характеристики устройств и специального оборудования, используемых в данном исследовании представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики используемого устройства

Table 2. Characteristics of the device used

Характеристики	DJI Phantom 4 PRO V1.0	Mavic Air 2
Масса, г	1388	570
Максимальная скорость в 3 режимах	Режим S: 72 км/ч	Режим S: 69 км/ч
	Режим A: 58 км/ч	Режим A: 55 км/ч
	Режим P: 50 км/ч	Режим P: 48 км/ч
Максимальная высота полета над уровнем моря	5000 м	5000м
Максимальная допустимая скорость ветра	до 15 м/с 29–38 км/ч	до 15 м/с 29–38 км/ч
Максимальная время полета	Около 30 минут	34 минуты
Спутниковые системы позиционирования	GPS/ГЛОНАСС	GPS/ГЛОНАСС
Емкость аккумулятора, мАч	5870	5200
Напряжение, В	15,2	11,55
Матрица, камера	1” CMOS Число эффективных пикселей: 20 млн	2 дюйма CMOS Число эффективных пикселей: 48 Мп и 12 Мп
Объектив	Угол обзора: 84° Эквивалент формата 24мм Диафрагма: f/2.8–11 Фокус: от 1 м до ∞ (автофокус)	Угол обзора: 84° Эквивалент формата 24 мм Диафрагма: f/2,8 Фокус: от 1 м до ∞
Диапазон рабочих температур	0°...+40°C	-10°...40°C
Передача видео	на 7 км (два канала) 4K/60 кадров/с	1080p: 10 км 4K/60 кадров/с
Распознавание препятствий, датчики	Спереди, сзади, по бокам 3 штук	Спереди, сзади по бокам, сверху снизу 5 штук
Максимальное расстояние полета (в штиль), км	14	18,5

Учетные работы по определению состава, встречаемости и проективного покрытия по видам устанавливали с использованием метода круговых учетных площадок радиусом 1.785 м (патент РФ № 2084129). Количество учетных площадок на каждом объекте исследования не менее 30 [4, 15]. Приемлемая точность учетных работ достигалась закладкой необходимого количества учетных площадок [15]. При выборе методики учетных работ учитывали и разработки других исследователей [1, 2, 8].

Предварительно каждая площадка, была проанализирована на основе открытых данных по материалам открытых web-картографических сервисов, что в последствии позволило подготовить полётные задания и провести геоинформационную оценку территории до проведения полёта (Рис.1).



Рисунок 1. Участок объекта исследования № 3 по данным Maxar Technologies.

Figure 1. Section of study site No. 3 based on Maxar Technologies data.

Материалы учетных работ, полученные наземным методом, обрабатывались камерально. При этом на круговых учётных площадках устанавливались видовой состав растительности, встречаемость и проективное покрытие для каждого вида. Результаты учёта обобщались и систематизировались по каждому объекту исследования.

Общий вид опытного участка № 1 (панорамный снимок заброшенных земель сельскохозяйственного назначения) представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Панорама объекта исследования № 1 с высоты 90 м (Псковская область)

Figure 1. Panorama of study site No. 1 from a height of 90 m (Pskov Oblast)

Результаты и обсуждение. По составу растительности обследованные участки пригодны для включения в сырьевую базу пчеловодства. Мёдопродуктивность угодий выше средних показателей по региону. Это связано с обилием видов медоносов, произрастающих как на открытом месте, так и под пологом древостоев в стенах леса по периметру опытных участков. Видовой состав растений, выявленных при наземном учёте на открытом месте, представлен в таблице 3. Несмотря на то, что обследование проводилось в режиме работы выполнения полётного задания, в перспективе можно отметить возможные применения БВС для решения данной задачи в полу и автоматизированном режимах. С развитием технологий искусственного интеллекта возможно так же и распознавание травянистой растительности для определения наилучшего расположения пасеки для получения конкретных вкусовых качеств мёда и выбора наиболее оптимальных мест размещения пасек. Возможно так же и организация автоматизированного мониторинга состояния пасек с использованием БВС. При обозначенном подходе БВС, собирает информацию и отправляет сведения на сервер сбора информации.

Таблица 3. Видовой состав, встречаемость и проективное покрытие медоносных растений на опытных объектах (Псковская область)

Table 3. Species composition, frequency of occurrence, and projective cover of nectar-producing plants at the experimental sites (Pskov Oblast)

Название вида	Номер объекта		
	1	2	3
Бодяк полевой *Cirsium arvense* (L.) Scop.	48/2.1	26/0.1	18/1.1
Василек луговой *Centauréa jacéa* L.	18/0.2	6/0.1	-
Вербейник обыкновенный *Lysimáchia vulgáris* L.	73/1.6	20/0.6	13/0.6
Вероника лекарственная *Veronica officinalis* L.	14/0.8	4/0.1	6/0.1
Вьюнок полевой *Convolvulus arvensis* L.	11/0.2	10/0.1	-
Герань лесная *Geránium sylváticum* L.	22/0.6	8/0.1	32/0.7
Горошек мышиный *Vícia crácca* .	96/3.8	66/1.8	54/2.0
Гравилат речной *Géum rivále* L.	10/0.2	18/0.3	10/0.2
Донник белый *Melilotus albus* Medik.	31/1.6	16/0.8	-
Донник лекарственный *Melilotus officinalis* (L.) Lam.	8/0.1	-	-
Дудник лесной *Angélica sylveśtris* L.	10/0.1	30/0.7	38/1.7
Зверобой продырявленный *Hypéricum perforátum* L.	20/0.4	16/0.4	-
Звездчатка ланцетовидная *Stellaria holostea* L.	21/1.3	21/1.3	21/1.3
Земляника лесная *Fragária vésca* L.	6/0.1	-	12/0.1
Золотарник обыкновенный *Solidago virgaurea* L.	10/0.1	10/0.2	18/0.9
Иван-чай *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.	60/5.2	55/6.8	68/6.0
Марьянник дубравный *Melampyrum nemorosum* L.	22/0.9	34/0.9	48/1.1
Клевер луговой *Trifolium praténse* L.	75/6.0	50/3.2	56/6.1
Колокольчик раскидистый *Campanula patula* L.	7/0.1	12/0.1	8/0.1
Крапива двудомная *Urtíca dióica* L.	28/1.1	44/2.0	40/1.1
Кульбаба осенняя *Scorzoneroides autumnalis* Moench	11/0.1	10/0.1	-
Купырь лесной *Anthríscus sylvéstris* L.	38/1.0	48/1.0	52/0.9
Лапчатка гусиная *Potentilla anserina* L.	17/0.1	10/0.1	28/0.3
Лапчатка прямостоя́чая *Potentílla erécta* Raeusch.	28/1.0	24/0.8	20/0.3
Люпин многолистный *Lupínus polyphýllus* Lindl.	81/2.2	70/1.8	-
Малина *Rúbus idáeus* L.	-	16/0.2	9/0.2
Марьянник дубравный *Melampýrum nemorósum* L.	27/0.1	12/0.1	-
Нивяник обыкновенный *Leucanthemum vulgare* Lam.	8/0.1	-	-

Одуванчик *Taraxacum officinale* (L.) Webb ex F.H.Wigg.	9/0.1	10/0.1	18/0.1
Осот полевой Sonchus arvensis L.	28/2.1	24/1.0	40/3.1
Пижма обыкновенная *Tanacetum vulgare* L.	12/0.1	10/0.1	18/0.1
Подмаренник душистый *Galium odoratum* (L.) Scop.	18/0.8	24/1.0	20/1.0
Подорожник большой *Plantágo májor* L.	9/0.1	9/0.1	12/0.1
Пырей ползучий *Elytrígia répens* L.)	48/1.1	40/1.0	20/0.1
Ромашка аптечная *Matricāria chamomīlla* L.	18/0.1	12/0.1	-
Сивец луговой *Succisa pratensis* Moench.	28/0.4	-	10/0.1
Сныть обыкновенная *Aegopódium podagrária* L.	48/1.8	48/2.0	20/0.6
Таволга вязолистная *Filipéndula ulmária* Maxim.	-	-	18/0.3
Трёхребник непахýчий *Tripleurospérmum inodórum* Sch. Bip.	10/0.1	-	-
Тысячелистник обыкновенный *Achilléa millefólium* L.	90/0.9	6/0.1	-
Череда трёхраздельная *Bidens tripartita* L.	37/0.2	48/0.5	32/0.2
Чина лесная *Láthyrus sylvéstris* L.	-	-	8/0.1
Щавель конский *Rúmex confértus* Willd.	36/2.0	40/1.8	36/1.2
Щавель кислый *Rumex acetosa* L.	24/0.1	8/0.1	12/0.1
Яснотка белая *Lámium álbum* L.	12/0.1	8/0.1	18/0.2
Ястребинка лесная *Hieracium murorum* L.	6/0.1	8/0.1	-
Ястребиночка *Pilosella officinarum* F.W.Schultz & Sch. Bip.	9/0.1	-	6/0.1
Количество видов	44	39	34

В составе живого напочвенного покрова всего выявлено более 60 видов растений. Из них от 34 до 44 видов, произрастающих на открытом месте, являются медоносами. Выделены и моновидовые растительные ассоциации из *Trifolium praténse* L.

Видовой состав растений на опытных участках под пологом древостоев, представлен в таблице 4.

Таблица 4. Видовой состав, встречаемость и проективное покрытие растений на опытных участках под пологом древостоев (Псковская область)

Table 4. Species composition, occurrence, and projective cover of plants in experimental plots under the canopy of tree stands (Pskov Region)

Название вида	Номер объекта		
	1	2	3
Бодяк полевой *Cirsium arvense* (L.) Scop.	48/2.1	26/0.1	18/1.1
Вербейник обыкновенный *Lysimáchia vulgáris* L.	73/1.6	20/0.6	13/0.6
Вероника лекарственная *Veronica officinalis* L.	14/0.8	4/0.1	6/0.1
Герань лесная *Geránium sylváticum* L.	22/0.6	8/0.1	32/0.7
Гравилат речной *Géum rivále* L.	10/0.2	18/0.3	10/0.2
Дудник лесной *Angélica sylveśtris* L.	10/0.1	30/0.7	38/1.7
Зверобой продырявленный *Hypéricum perforátum* L.	20/0.4	16/0.4	-
Звездчатка ланцетовидная *Stellaria holostea* L.	21/1.3	21/1.3	21/1.3
Земляника лесная *Fragária vésca* L.	6/0.1	-	12/0.1
Золотарник обыкновенный *Solidago virgaurea* L.	10/0.1	10/0.2	18/0.9
Иван-чай *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.	60/5.2	55/6.8	68/6.0
Марьянник дубравный *Melampyrum nemorosum* L.	22/0.9	34/0.9	48/1.1
Крапива двудомная *Urtíca dióica* L.	28/1.1	44/2.0	40/1.1
Купырь лесной *Anthríscus sylvéstris* L.	38/1.0	48/1.0	52/0.9
Малина *Rúbus idáeus* L.	-	16/0.2	9/0.2

Марьянник дубравный *Melampýrum nemorósum* L.	27/0.1	12/0.1	-
Осот полевой Sonchus arvensis L.	28/2.1	24/1.0	40/3.1
Подмаренник душистый *Galium odoratum* (L.) Scop.	18/0.8	24/1.0	20/1.0
Сныть обыкновенная *Aegopódium podagrária* L.	48/1.8	48/2.0	20/0.6
Таволга вязолистная *Filipéndula ulmária* Maxim.	-	-	18/0.3
Трёхребник непахýчий *Tripleurospérmum inodórum* Sch. Bip.	10/0.1	-	-
Череда трёхраздельная *Bidens tripartita* L.	37/0.2	48/0.5	32/0.2
Чина лесная *Láthyrus sylvéstris* L.	-	-	8/0.1
Щавель конский *Rúmex confértus* Willd.	36/2.0	40/1.8	36/1.2
Яснотка белая *Lámium álbum* L.	12/0.1	8/0.1	18/0.2
Ястребинка лесная *Hieracium murorum* L.	6/0.1	8/0.1	-
Количество видов	23	22	22

На снимке отчетливо видны контуры опытных участков. Легко выделяются различные биотопы и отдельные характеристики древесной растительности. Снимок дает общее представление и о смежных участках леса, что необходимо учитывать при оценке сырьевой базы пчеловодства.

Более детально, характеристики фитоценозов «читаются» на снимках, полученных при съёмке с высоты 50-70 м (рис. 2 и 3).



Рисунок 2. Объект исследования № 2 с высоты 70 м (Псковская область)

Figure 2. Object of study No. 2 from a height of 70 m (Pskov Oblast)

Сравнительная оценка состояния и определение основных характеристик молодняков на опытном участке проведена с применением БПЛА и наземным методом [5-7], на который имеется патент РФ [5]. Съемка выдела производилась с помощью квадрокоптера модели DJI Air 2 S с пространственным разрешением 3–4 см/пиксель при высоте съемки 5-90 м.



Рисунок 3. Объект исследования № 3 с высоты 70 м (Псковская область)
Figure 3. Object of study No. 3 from a height of 70 m (Pskov Oblast)

В составе живого напочвенного покрова выявлено от 34 до 44 видов медоносных растений. 23 вида. Из них встречаемость более 50 % имеют 17 видов. Доля видов с проективным покрытием более 5 % составляет от 16 до 20 %.

Заключение. При использовании БПЛА в лесном хозяйстве возникают определенные трудности, связанные с непрозрачностью полога, образованного кронами деревьев верхнего яруса. К недостаткам использования БПЛА можно отнести высокую стоимость оборудования, зависимость от погодных условий (дождь, сильный ветер, туман). Нижние ярусы растительности остаются скрытыми для съёмки с БПЛА. На открытом месте использование БПЛА во всех отношениях даёт преимущества перед наземными методами исследований.

Применение беспилотных летательных аппаратов позволяет получать в реальном времени актуальную информацию. Благодаря дистанционному мониторингу можно оперативно получать основные характеристики объекта исследования и проектировать необходимые мероприятия.

Видовой состав травянистой растительности на постаграрных землях характеризуется большим разнообразием – около 60 видов сосудистых растений. Различия по величине встречаемости и проективному покрытию видов в составе живого напочвенного покрова по опытным участкам не велики, что можно объяснить сравнимыми почвенно-грунтовыми условиями на всех опытных участках. Доля общих видов в составе травостоя в отдельных случаях достигает 91 %. Проективное покрытие основной части видов не превышает 5 %. По встречаемости и проективному покрытию доминируют гелиофиты.

Выводы: Полученные в ходе исследования данные позволяют интерпретировать ряд важных геоэкологических аспектов которые касаются состояния постагрогенных и лесных экосистем на участках обследования.

Объект № 1 (8.3 га), представляющий собой заброшенные сельскохозяйственные земли, демонстрирует классический пример вторичной сукцессии. Высокое видовое разнообразие (более 60 видов сосудистых растений) и доминирование гелиофитов (светолюбивых видов), таких как Иван-чай (Chamaenerion angustifolium) с проективным покрытием до 6.8% и Осот полевой (Sonchus arvensis) — показатели начальной стадии зарастания бывших полей. Количество видов под пологом леса стабильно (22–23 вида), что свидетельствует об однородности почвенно-грунтовых условий в пределах исследуемого лесного массива.

Обилие *Щавеля конского (Rumex confertus)*, покрытие до 2.0% и *Крапивы двудомной (Urtica dioica)*, покрытие до 2.0% прямо указывает на повышенную трофность (богатство азотом и органикой) почв. Это типично для окраин леса, бывших усадеб или мест выпаса скота. Присутствие *Подмаренника душистого (Galium odoratum)* и *Сныти обыкновенной (Aegopodium podagraria)* характеризует участки как достаточно увлажненные, богатые гумусом стародубы или мезофитные луга.

В отношении применении технологий БАС. Съёмка с высоты 50-90 метров позволяет проводить точное картирование местности и биотопов, оценивать дистанционно возможные места расположения пасеки и видовой состав древесных растений. Однако для проведения съёмки для определения травянистой растительности, необходимо проведение съёмки на высоте от 3 до 10 м, что возможно только на открытых участках и подтверждено авторами в предыдущих работах [3]. Использование БВС под пологом леса возможно, но при включённых режимах повышенной опасности с дополнительным включением боковых ультразвуковых датчиков от столкновений. Фактически возможно использование для обозначенной задачи микро БВС, размер которых и сенсорные системы более адаптивны к участкам с плотным наличием объектов.

С точки зрения пчеловодства ресурсная база обладает достаточно высоким потенциалом. Выявление от 34 до 44 видов медоносов на открытых участках обеспечивает непрерывный конвейнер цветения с ранней весны до поздней осени. Наличие ключевых лесных медоносов дополняет ресурсную базу открытого ландшафта. В целом опытные участки являются переходными зонами между лесным и бывшими аграрными ландшафтами, которые характеризуются наибольшими значениями биологического разнообразия и высокой геоэкологической активностью.

Список использованных источников

1. Алексеев А.С., Данилов Ю.И., Никифоров А.А., Гузюк М.Е., Киреев Д.М. Опыт применения беспилотного летательного аппарата для инвентаризации и оценки опытных лесных культур Лисинской части Учебно-опытного лесничества Ленинградской области // Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. - 2020. - № 2. - С. 46-52. DOI 10.21178/2079–6080.2020.2.46.
2. Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Андреев Д.Н. Подготовка и применение материалов аэрофотосъемки для изучения лесов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. № 2-2. – С. 313-317.
3. И. А. Мельничук, М. Р. Вагизов, Т. В. Двадцатова [и др.] Изучение видового состава газонов: наземное исследование и применение беспилотных летательных аппаратов // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2023. – С. 520-522.
4. Вагизов М.Р. Разработка базы данных трехмерных моделей хвойных лесообразующих пород сосны и ели обыкновенной для геоинформационной модели лесной экосистемы // Информация и космос. 2022. № 2. С. 162-167.
5. Вагизов М.Р., Потапов А.П. Технологии машинного обучения и обработки таксационных данных для визуализации геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 2) // Информация и космос. 2023. № 1. С. 148-156.
6. Вагизов М.Р., Лобачева В.А. Особенности геоинформационного моделирования при мониторинге лесовосстановления // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 194-196.
7. Вагизов М.Р. Технология и метод геоинформационного моделирования и управления лесными экосистемами: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / СПб.:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный гидрометеорологический университет". 2024. 288 с.

8. Волгушева Н.Э., Прокофьев Н.А., Бляхарский Д.П. Технология расчета вегетационного индекса на основании данных беспилотной аэрофотосъемки // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. № 2. С. 71-76.

9. Гафуров А.М. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки почвенной эрозии // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. - 2019. - Т. 43, - № 2. - С. 182-190. doi: 10.18413/2075-4671-2019-43-2-182-190.

10. Герасимова Т.А., Мерзук С.А., Вагизов М.Р. Применение геоинформационного моделирования и геоинформационного проектирования в деятельности лесного хозяйства // Информационные системы и технологии: теория и практика / сборник научных трудов. Отв. редактор М.Р. Вагизов. Санкт-Петербург, 2023. С. 38-44.

11. Грязькин А.В. Методика комплексных учётных работ при геоботанических исследованиях // Проблемы ботаники на рубеже XX-XXI веков. - СПб.: БИН, 1998. Т. 1. С. 238-239.

12. Грязькин А.В. Влияние метода на точность и достоверность результатов исследования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. СПб.: ЛТА, 1999. С. 12-18.

13. Грязькин А.В., Динамика видового состава медоносов на постагрогенных и лесных землях / А. В. Грязькин, С. Г. Парамонов, Е. И. Семенова, М. А. Хоанг // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 8. – С. 4-7. – DOI 10.28983/asj.y2022i8pp4-7.

14. Данилов, Д.А., Яковлев, А.А., Крылов И.А. Формирование естественных растительных ассоциаций на постагрогенных землях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 242. С. 60-82. http://www.doi.org/10.21266/2079-4304.2023.242.60-82.

15. Зубарев Ю .Н., Фомин Д .С., Чащин А .Н., Заболотнова М .В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. - 2019. – № 5. – С. DOI: 10.7242/2658-705X/2019.2.5.

16. Казамбаев М.К., Куатов Б.Ж. Некоторые вопросы использования беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. - № 4(20). – С. 97-100. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-4-13.

17. Коптев С.В., Скуднева О.В. О возможностях применения беспилотных летательных аппаратов в лесохозяйственной практике // Лесн. журн. 2018. № 1. С. 130-138. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.130.

18. Медведев А.А., Тельнова Н.О., Кудиков А.В. Дистанционный высокодетальный мониторинг динамики зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель лесной растительностью // Вопросы лесной науки. 2019. №3. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12.

19. Мелихова Е.В., Мелихов Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в аграрном производстве // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2019. - № 3. – С. 15-21.

20. Наквасина Е.Н., Петрова Н.В. Структура ценофлоры живого напочвенного покрова в постагрогенных лесах в Кенозерском национальном парке // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2023. № 2 (46). С. 89-101.

21. Овчинникова Н.Г., Медведков Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства // Экономика и экология территориальных образований. – 2019. – Т. 3. - № 1. – С. 98-108. doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108.

22. Петушкова В.Б., Потапова С.О. Мониторинг и охрана лесов с применением беспилотных летательных аппаратов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. - 2018. - С. 717-724.

23. Поздеева С.Д., Вагизов М.Р. Оценка естественного лесовосстановления на болотистых местностях на основе обработки данных дистанционного зондирования земли // Актуальные вопросы лесного хозяйства. Материалы VIII международной молодежной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 172-176.

24. Способ учета подроста Пат. 2084129 Российская Федерация, МКИ С 6 А 01 G 23/00 / Грязькин А.В. № 94022328/13; Заяв. 10.06.94; Опуб. 20.07.97, Бюл. № 20.

25. Телеснина, В.М. Постагрогенная динамика растительности и свойств почвы в ходе демутационной сукцессии в южной тайге // Лесоведение. 2015. № 4. С. 293–306.

26. Шмелев Г.Б., Грязькин А.В., Парамонов С.Г., Остаков А.В., Семенова Е.И. Видовое разнообразие растительности на бывших землях сельскохозяйственного назначения // Аграрный научный журнал. 2024. № 10. С. 60–65. http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i1pp60-

27. Arnold, T. UAV-based measurement of vegetation indices for environmental monitoring / T. Arnold, M. De Biasio, A. Fritz, R. Leitner // 7-th International Conference on Sensing Technology. 2013. P. 704-707.

28. Du Y P, Liu F R, Wang H F, et al. Preliminary study on investigation of wild woody forest food germplasm resources in Jiuzhaigou County // Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2020, 41(4): 69−77 doi: 10.12172/202003130002.

29. Enescu C.M. Which are the most important non-wood forest products in the case of Ialomi – a County // AgroLife Scientific J. 2017, vol. 6(1), pp. 98-103.

30. Gryazkin A., Bespalova V., Samsonova I. (et al.). Potential reserves and development of non-wood forest resources. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. 453-468. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012007.

31. Getzin, S. Assessing biodiversity in forests using very highresolution images and unmanned aerial vehicles / S. Getzin, K. Wiegand, I. Schoning // Methods in Ecology and Evolution. 2012. Vol. 3. P. 397-404.

32. Gini, R. Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: A test in a park area of northern Italy / R. Gini, D. Passoni, L. Pinto, G. Sona // European Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 47 (1). P. 251-269.

33. Launchbury, R. Unmanned aerial vehicles in forestry (Short Survey) // Forestry Chronicle. 2014. Vol. 90 (4). P. 418-419.

34. Lehmann, J.R.K. Analysis of unmanned aerial system-based CIR images in forestry a new perspective to monitor pest infestation levels / J.R.K. Lehmann, F. Nieberding, T. Prinz, C. Knoth // Forests. 2015. Vol. 6 (3). P. 594-612.

35. Lisein, J. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery / J. Lisein, M. Pierrot-Deseilligny, S. Bonnet, P. Lejeune // Forests. 2013. Vol. 4 (4). P. 922-944.

36. Paneque-Gálvez, J. Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas / J. Paneque-Gálvez, M.K McCall, B.M. Napoletano et al. // Forests. 2014. Vol. 5 (6). P. 1481-1507.

37. Pierzchaia, M. Estimating soil displacement from timber extraction trails in steep terrain: Application of an unmanned aircraft for 3D modeling / M. Pierzchaia, B. Talbot, R. Astrup // Forests. 2014. Vol. 5 (6). P. 1212-1223.

38. Von Wahl, N. An integrated approach for early forest fire detection and verification using optical smoke, gas and microwave sensors / N. Von Wahl, S. Heinen, H. Essen et al. // International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires. Forest Fires. 2010. Vol. 137. P. 97106.

39. Zhao Yang, WU Pan, HU Yi-gang, Zhang Zhi-shan. Plant species diversity in farmland drainage ditches in Hetao Irrigation Region, Inner Mongolia // Chinese Journal of Ecology. – 2011. – Vol. 30. - Issue 12. - page: 2797-2802.

References

1. Alekseev A.S., Danilov Yu.I., Nikiforov A.A., Guzyuk M.E., Kireev D.M. Experience in using an unmanned aerial vehicle for the inventory and assessment of experimental forest plantations in the Lisino section of the Educational and Experimental Forestry Enterprise, Leningrad Region // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute. – 2020. – No. 2. – P. 46–52. DOI 10.21178/2079–6080.2020.2.46.

2. Buzmakov S.A., Sannikov P.Yu., Andreev D.N. Preparation and application of aerial photography materials for forest studies // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 18, No. 2-2. – P. 313-317.

3. Melnichuk I.A., Vagizov M.R., Dvadtsatova T.V. [et al.] Study of lawn species composition: ground-based survey and the use of unmanned aerial vehicles // Forests of Russia: Policy, Industry, Science, Education: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, May 24–26, 2023. – St. Petersburg: S.M. Kirov St. Petersburg State Forest Technical University, 2023. – P. 520–522.

4. Vagizov M.R. Development of a database of 3D models of coniferous forest-forming species (Scots pine and Norway spruce) for a geoinformation model of a forest ecosystem // Information and Space. – 2022. – No. 2. – P. 162–167. 5. Vagizov M.R., Potapov A.P. Machine learning and forest inventory data processing technologies for the visualization of geoinformation modeling of forest ecosystems (Part 2) // Information and Space. 2023. No. 1. P. 148-156.

6. Vagizov M.R., Lobacheva V.A. Specifics of geoinformation modeling in forest regeneration monitoring // Forests of Russia: Policy, Industry, Science, Education. Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference. St. Petersburg, 2023. P. 194-196.

7. Vagizov M.R. Technology and method of geoinformation modeling and management of forest ecosystems: Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University. 2024. 288 p.

8. Volgusheva N.E., Prokofiev N.A., Blyakharsky D.P. Technology for calculating the vegetation index based on UAV aerial photography data // Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography. 2016. No. 2. P. 71-76.

9. Gafurov A.M. Use of unmanned aerial vehicles for soil erosion assessment // Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Natural Sciences. 2019. Vol. 43, No. 2. P. 182-190. doi: 10.18413/2075-4671-2019-43-2-182-190.

10. Gerasimova T.A., Merzuk S.A., Vagizov M.R. Application of geoinformation modeling and geoinformation design in forestry // Information systems and technologies: theory and practice / collection of scientific papers. Rep. editor M.R. Vagizov. St. Petersburg, 2023. pp. 38-44.

11. Gryazkin A.V. Methodology of complex accounting work in geobotanical research // Problems of botany at the turn of the XX-XXI centuries. - St. Petersburg: BIN, 1998. T. 1. P. 238-239.

12. Gryazkin A.V. The influence of the method on the accuracy and reliability of the research results // News of the St. Petersburg Forestry Academy. St. Petersburg: LTA, 1999. pp. 12-18.

13. Gryazkin A.V., Dynamics of the species composition of honey plants on postagrogenic and forest lands / A.V. Gryazkin, S.G. Paramonov, E.I. Semenova, M.A. Hoang // Agricultural Scientific Journal. – 2022. – No. 8. – P. 4-7. – DOI 10.28983/asj.y2022i8pp4-7.

14. Danilov, D.A., Yakovlev, A.A., Krylov I.A. Formation of natural plant associations on post-agricultural lands // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2023. Issue 242. Pp. 60-82. http://www.doi.org/10.21266/2079-4304.2023.242.60-82.

15. Zubarev Yu.N., Fomin D.S., Chashchin A.N., Zabolotnova M.V. Use of unmanned aerial vehicles in agriculture // Bulletin of the Perm Federal Research Center. – 2019. – No. 5. – DOI: 10.7242/2658-705X/2019.2.5.

16. Kazambaev M.K., Kuatov B.Zh. Some issues regarding the use of unmanned aerial vehicles // Reliability and Quality of Complex Systems. – 2017. – No. 4(20). – Pp. 97-100. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-4-13.

17. Koptev S.V., Skudneva O.V. On the possibilities of using unmanned aerial vehicles in forestry practice // Forestry Journal. 2018. No. 1. Pp. 130-138. (Proceedings of Higher Educational Institutions). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.130.

18. Medvedev A.A., Telnova N.O., Kudikov A.V. High-resolution remote monitoring of forest encroachment dynamics on abandoned agricultural lands // Forest Science Issues. 2019. No. 3. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12.

19. Melikhova E.V., Melikhov D.A. Application of unmanned aerial vehicles in agricultural production // International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral". – 2019. – No. 3. – P. 15–21.

20. 20. Nakvasina E.N., Petrova N.V. Structure of the coenoflora of the living ground cover in post-agricultural forests of Kenozero National Park // Bulletin of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal. 2023. No. 2 (46). Pp. 89–101.

21. Ovchinnikova N.G., Medvedkov D.A. Application of unmanned aerial vehicles in land management, cadastre, and urban planning // Economics and Ecology of Territorial Entities. – 2019. – Vol. 3. – No. 1. – P. 98-108. doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108.

22. Petushkova V.B., Potapova S.O. Forest monitoring and protection using unmanned aerial vehicles // Fire Safety: Problems and Prospects. – 2018. – P. 717-724.

23. Pozdeeva S.D., Vagizov M.R. Assessment of natural forest regeneration in wetland areas based on Earth remote sensing data processing // Current Issues in Forestry. Proceedings of the VIII International Youth Scientific and Practical Conference. St. Petersburg, 2024. P. 172-176.

24. Method for accounting for undergrowth. Patent 2084129 Russian Federation, MKI C 6 A 01 G 23/00 / Gryazkin A.V. No. 94022328/13; Appl. 10.06.94; Publ. 20.07.97, Bull. No. 20.

25. Telesnina V.M. Post-agrogenic dynamics of vegetation and soil properties during demutational succession in the southern taiga // Lesovedenie (Forest Science). 2015. No. 4. P. 293–306.

26. Shmelev G.B., Gryazkin A.V., Paramonov S.G., Ostakov A.V., Semenova E.I. Species diversity of vegetation on former agricultural lands // Agrarian Scientific Journal. 2024. No. 10. P. 60–65. http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i1pp60-

27. Arnold, T. UAV-based measurement of vegetation indices for environmental monitoring / T. Arnold, M. De Biasio, A. Fritz, R. Leitner // 7th International Conference on Sensing Technology. 2013. P. 704-707.

28. Du Y.P., Liu F.R., Wang H.F., et al. Preliminary study on investigation of wild woody forest food germplasm resources in Jiuzhaigou County // Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2020, 41(4): 69−77 doi: 10.12172/202003130002.

29. Enescu C.M. Which are the most important non-wood forest products in the case of Ialomița County // AgroLife Scientific J. 2017, vol. 6(1), pp. 98-103.

30. Gryazkin A., Bespalova V., Samsonova I. (et al.). Potential reserves and development of non-wood forest resources. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. 453-468. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012007.

31. Getzin, S. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles / S. Getzin, K. Wiegand, I. Schoning // Methods in Ecology and Evolution. 2012. Vol. 3. P. 397-404.

32. Gini, R. Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: A test in a park area of northern Italy / R. Gini, D. Passoni, L. Pinto, G. Sona // European Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 47(1). P. 251-269.

33. Launchbury, R. Unmanned aerial vehicles in forestry (Short Survey) // Forestry Chronicle. 2014. Vol. 90 (4). P. 418-419.

34. Lehmann, J.R.K. Analysis of unmanned aerial system-based CIR images in forestry a new perspective to monitor pest infestation levels / J.R.K. Lehmann, F. Nieberding, T. Prinz, C. Knoth // Forests. 2015. Vol. 6 (3). P. 594-612.
35. Lisein, J. A photogrammetric small workflow for the creation of a forest canopy height model from unmanned aerial system imagery / J. Lisein, M. Pierrot-Deseilligny, S. Bonnet, P. Lejeune // Forests. 2013. Vol. 4 (4). P. 922-944.
36. Paneque-Gálvez, J. Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas / J. Paneque-Gálvez, M.K McCall, B.M. Napoletano et al. //Forests. 2014. Vol. 5 (6). P. 1481-1507.
37. Pierzchaia, M. Estimating soil displacement from timber extraction trails in steep terrain: Application of an unmanned aircraft for 3D modeling / M. Pierzchaia, B. Talbot, R. Astrup // Forests. 2014. Vol. 5 (6). P. 1212-1223.
38. Von Wahl, N. An integrated approach for early forest fire detection and verification using optical smoke, gas and microwave sensors / N. Von Wahl, S. Heinen, H. Essen et al. // International Conference on Modeling, Monitoring and Management of Forest Fires. Forest Fires. 2010. Vol. 137. P. 97106.
39. Zhao Yang, WU Pan, HU Yi-gang, Zhang Zhi-shan. Plant species diversity in farmland drainage ditches in Hetao Irrigation Region, Inner Mongolia // Chinese Journal of Ecology. – 2011. – Vol. 30. - Issue 12. - page: 2797-2802.

ASSESSMENT OF THE RAW MATERIAL BASE OF BEEKEEPING USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Vagizov Marsel R.
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Saint Petersburg
E-mail: bars-tatarin@yandex.ru

Gryazkin Anatoly V.
Doctor of Biological Sciences, Professor
Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov
Saint Petersburg
E-mail: lesovod@bk.ru

Paramonov Sergey G.
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
Saint Petersburg State Chemical-Pharmaceutical University
of the Ministry of Health of the Russian Federation
Saint Petersburg
E-mail: sergei.paramonov@pharminnotech.com

Shmelev Gleb B.
Graduate student
Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov,
Saint Petersburg
E-mail: g-shmelev@tbs.spb.ru

© Вагизов М.Р., Грязькин А.В., Парамонов С.Г., Шмелёв Г.Б. 2026