

DOI 10.31509/2658-607x-2021-44-92  
УДК 614.842; 630\*96

## ОБЗОР ОПЫТА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

© 2021 г.

Е. С. Подольская

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва  
Россия, 117799, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32*

E-mail: podols\_kate@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.08.2021

После доработки: 10.11.2021

Принято к публикации: 19.11.2021

В статье систематизирован опыт решения задачи транспортного моделирования наземного доступа к лесным пожарам и ресурсам леса, представленный научными и инженерными работами. Дана общая характеристика транспортного моделирования на основе российских и иностранных работ; представлен анализ сервисов данных и разработок Open Source как актуальных направлений развития транспортных проектов. Основное внимание уделено обзору вопросов транспортного моделирования в использовании, охране, защите и воспроизводстве лесов с учетом актуальных российских нормативных документов отрасли. Описаны источники геоданных, показаны возможности использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) разного типа и пространственного разрешения для транспортного моделирования в лесном хозяйстве. Российские исследования по лесному транспортному моделированию и лесной инфраструктуре представлены работами профильных научных и учебных организаций, имеющих свою тематическую специализацию. Общим для них является понимание комплексного характера транспортной доступности лесов. Отмечено, что интерес исследователей традиционно развивается в решении экологических и экономических задач моделирования. Необходимо продолжение работ по моделированию расположения сети пожарно-химических станций (ПХС), лесосек и складов для модельных территорий в разных субъектах административно-территориального деления России и с разными характеристиками лесной инфраструктуры. Разработка методов и технологических решений определения и сохранения баланса между антропогенной инфраструктурной нагрузкой и природной устойчивостью лесных экосистем обозначена как направление дальнейших исследований. Выполненный обзор подходов показывает закономерности транспортного моделирования в лесах как части лесного хозяйства с использованием современной прикладной геоинформатики.

**Ключевые слова:** *лесное хозяйство, транспортное моделирование, транспортная доступность, наземный доступ, лесные пожары, лесные ресурсы, лесные дороги, ГИС, Open Source*

Лесное хозяйство является одним из пяти взаимосвязанных блоков лесного сектора экономики (Соколов, 2019). Как известно, лесное хозяйство представляет собой отрасль, которая занимается *воспроизводством, охраной и защитой лесов* от воздействия негативных факторов, а также вопросами регулирования и учета лесных ресурсов. В свою очередь, ресурсы леса являются одними из необходимых и важных природных ресурсов мира, обладающими свойствами защиты, оздоровления и регулирования климата. Распределение лесных ресурсов неоднородно по регионам мира и нашей страны, динамично во времени, обусловлено природными и антропогенными процессами и явлениями. Деятельность по управлению лесными ресурсами должна быть долгосрочным процессом, основанным на прагматических и научно обоснованных решениях, как отмечается в работе Goldamm et al. (2017).

Обеспечение транспортного доступа к лесным ресурсам и лесным пожарам продолжает оставаться актуальной задачей экономики России с ее современной спецификой (законодательной, финансовой, логистической, страховой и т. д.). Транспортная доступность является одним из видов доступности наряду с экономической (Третьяков, 2015) и определяется плотностью транзитных путей, которые, в свою очередь, помимо судоход-

ных участков рек и железных дорог, включают автомобильные дороги федерального и регионального значения (Починков, 2015).

На долю нашей страны приходится более 1/5 всех мировых ресурсов леса, при этом земли лесного фонда составляют большую часть площади земель страны, а лесистость ее территории является одной из самых высоких в мире (Лукина и др., 2020). Инфраструктура дорог общего пользования более развита в европейской части России, в то время как в ее азиатской части расположена большая часть природных ресурсов (Дабиев, Дабиева, 2015), в том числе и лесных.

Целью статьи является представление и описание существующих подходов к решению задачи транспортного моделирования в лесном хозяйстве с акцентированием особенностей современной российской практики для ресурсов леса и лесных пожаров.

Структурно обзор разделен на три части: в первой рассмотрены общие закономерности современного транспортного моделирования, во второй освещены его особенности в охране, защите и воспроизводстве лесов, третья часть содержит описание исследований российских научных организаций и вузов. Актуальность предлагаемого обзора обусловлена необходимостью определения новых возможностей сохранения и развития лесных экосистем.

## 1. СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ТРАНСПОРТНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

Тема транспортного моделирования (в англоязычной литературе используется набор родственных по смыслу наименований: *transport modelling*, *transportation accessibility*, *transportation infrastructure*, *planning for accessibility*, *transport planing*) в настоящее время достаточно освоена, что связано с тенденцией комплексного и непрерывного развития территорий, одной из характеристик которой и является транспортная доступность (Liu, Zhu, 2004; Chen, Jia, 2019; Chen et al., 2020). Транспортное моделирование рассматривается как процесс принятия решений (Семёнов, Ермаков, 2015). Транспортное моделирование и транспортная доступность являются предметом исследований многих тематических областей, связанных с экономикой, экологией, природными ресурсами и т. д., например работы Майорова (2014), Petrov et al. (2019), Chen et al. (2020), Wenz et al. (2020). Транспортная доступность является одним из факторов, влияющим на окружающую среду (Dunn et al., 2017). Междисциплинарный характер задачи транспортной доступности и возможности создания разнообразных приложений иллюстрируется работами групп авторов, среди которых отметим проекты Nelson (2008), Ibisch et al. (2016), Weiss et al.

(2018), в которых участвуют многонациональные коллективы ученых из разных стран и организаций. Общим для подобных проектов является использование больших геоданных, объединение пространственно разрозненных транспортных моделей (Bezrukova et al., 2020) и геовизуализация, что в совокупности определяет тренд транспортного моделирования (Loidl et al., 2016).

Появились и используются новые технические возможности хранения значительных объемов данных по дорогам разных типов и связанной с ними транспортной инфраструктуре. Современные транспортные геоданные достаточно разнообразны по своим источникам, масштабам, форматам, назначению и вариантам использования, могут быть «открытыми» или коммерческими продуктами. Качество данных по транспортной инфраструктуре является предметом изучения и описания в национальных и международных стандартах, например ISO 19157 в работе Drobnyak et al. (2016).

Транспортное моделирование следует направлению предоставления сервисов вместо инфраструктурных данных и предлагает варианты с отображением и использованием географических данных о локации в виде SaaS- (*Software as a Service*) и PaaS-решений (*Platform as a Service*). Такие сервисы используются широким кругом пользователей для решения задач

построения и анализа маршрутов, проектирования дорожной сети и не требуют установки специального программного обеспечения. На стороне сервера хранятся данные и выполняется запрашиваемый пользователем анализ, результаты которого сам пользователь получает онлайн. Востребованность сервисных решений в последние годы связана с ростом сложности самой транспортной инфраструктуры, непрерывным сбором данных по ее объектам, движению транспорта и невозможностью хранить необходимые наборы данных на стороне пользователя.

Направлением последних лет является разработка и совершенствование систем на основе технологии Open Source (ПО с открытым исходным кодом), на которой основано значительное число работ научного и инженерного характера. Большой, современный и подробный обзор таких инструментов для транспортного планирования опубликован в работе Lovelace (2021). Отмечается, что они представляют серьезную конкуренцию проприетарным (коммерческим) продуктам. Большая часть модулей (отдельные самостоятельные программы, интерфейсы или QGIS-плагины) реализована на языках Python, JavaScript, C++, Java и R.

Характерным примером Open Source является немецкая платформа MATSim для реализации крупномасштабного транспортного мультиагент-

ного моделирования (Horni et al., 2016). Этот программный продукт позволяет моделировать реальную транспортную систему, оценивать пропускную способность на ее участках, организовывать маршруты движения, оценивать окупаемость дороги. В самом простом варианте симуляция использует набор файлов `network` (сеть, по которой передвигаются агенты – любые транспортные средства), `plans` (представление планов агентов) и `config` (настройки для запуска сценария движения). Платформа занимает первую строчку в описательной таблице работы Lovelace (2021) со ссылкой на источники цитирования (Google Scholar, GitHub и web-поиск); по количеству цитирований MATSim опережает проприетарные аналоги (по состоянию на август 2020 г.).

Таким образом, информационные и геоинформационные технологии, использование сервисов данных, разработки Open Source являются основой современных транспортных исследований. Геоданные для транспорта, объем и качество накапливаемых архивов продолжают оставаться актуальной темой для методических и технологических решений. Роль инструментов Open Source будет только повышаться и представлять все больше альтернатив при сравнении и выборе функциональности с такими коммерческими продуктами, как ArcGIS и MapInfo.

## **2. ТРАНСПОРТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ОХРАНЕ, ЗАЩИТЕ И ВОСПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕСОВ**

### **2.1. Общая характеристика**

Значительное число статей, опубликованных международным научным сообществом в последние несколько десятков лет (Ефремов, 2009; Дубовик, 2013; Третьяков, 2015; Акау et al., 2012; Malladi, Sowlati, 2017; Акау et al., 2018; Акау, 2019; Chen, Jia, 2019; Podolskaia et al., 2020b, 2020c; Акау, 2021), подтверждает важное значение решения транспортной задачи в комплексе мероприятий по рациональному и безопасному лесопользованию. Расчет для определения оптимальной плотности сети лесных дорог представлен в статье Krutov (2019), построение безопасных маршрутов движения описано в работе Акау (2021), определение экономического эффекта от улучшения сети дорог рассмотрено в работе Акау et al. (2020). Как отмечают российские эксперты лесной отрасли, в частности Главатский (2000), Мартынюк и др. (2016), необходимо продолжение исследований с целью разработки методов оптимизации расположения центров сосредоточия сил и средств, какими для лесной отрасли являются пожарно-химические станции (ПХС), лесосеки и склады, а также дифференциации территории для це-

лей лесопользования. Работы по лесному транспортному моделированию выполняются на разных административных уровнях, какими для России являются субъект административно-территориального деления и федеральный округ (ФО). Так, в работе Якушевой (2014) для Северо-Западного ФО определена недостаточная (согласно российским нормам) плотность лесных дорог.

Организация охраны, защиты и воспроизводства лесных экосистем в современных экономических условиях России и других «лесных» стран сопряжена с определенными трудностями (Лупян и др., 2017). *Транспортная доступность* является определяющим элементом указанной триады (ее можно дополнить *использованием лесов*). Доступ к лесным пожарам и участкам леса ограничен и требует решения задач оценки существующего и поиск оптимального (по набору параметров) размещения указанных центров сосредоточия сил и средств. Так, для оценки размещения ПХС в российской (Podolskaia et al., 2019) и турецкой (Акау et al., 2011) лесных практиках имеет значение учет нескольких основных факторов: наличие подъездов (дорожной сети разных типов), природная пожарная опасность, необходимость размещения как минимум одной ПХС в пределах участкового лесничества (для России). Административ-

ные барьеры и зоны ответственности участков лесничеств, однозначность принадлежности отдельного лесного участка тому или иному участковому лесничеству в условиях чрезвычайной ситуации при борьбе с лесными пожарами, геометрия самих лесничеств усложняют доступ специального транспорта даже при наличии развитой сети дорог и населенных пунктов.

Общепринятым для триады *охраны, защиты и воспроизводства* является использование геоинформационных технологий. Тема транспортных ГИС-разработок в лесном хозяйстве, проблематика создания и развития системы транспортных тематических моделей, например построение оптимальных маршрутов в веб-ГИС среде (Alazab et al., 2011), по-прежнему актуальна. В последние десятилетия в российской и международной научной и производственной практике появилась потребность в разработке и совершенствовании пространственных транспортных моделей для управления тушением лесных пожаров в регионах (Логинов и др., 2016; Котельников и др., 2017). Современные ГИС, позволяющие интегрировать разные виды информации, показали новые методические и технологические возможности пространственного анализа в лесной отрасли (Малышева, 2007) для учета лесного фонда на государственном уровне. С помощью геоинформа-

тики продолжают разрабатываться научные основы для зонирования территории по уровням охраны, противопожарного обустройства лесов, размещения мест хранения средств охраны и защиты лесов, для определения экономической целесообразности и ценности лесов. Так, например, монография по лесному фонду Архангельской области (Абрамова, Феклистов, 2015) содержит анализ процессов управления лесным хозяйством и ведения лесохозяйственных мероприятий с разработкой системы информационной поддержки управления лесами и лесопользования на ГИС-основе.

Система наземной охраны лесов России основывается на сети ПХС разного уровня оснащения противопожарным инвентарем и оборудованием, транспортными средствами и пожарными командами с целью предупреждения, своевременного обнаружения, ограничения распространения и ликвидации лесных пожаров. Основные положения о ПХС как центрах накопления и распределения сил и средств для выездов на лесные пожары, располагающихся, как правило, в пределах населенных пунктов, были разработаны в 90-е гг. XX в. (Положение о пожарно-химических станциях..., 1997) и продолжают оставаться актуальным документом отрасли.

Важное значение для транспортного лесного моделирования имеют



лесные дороги. Согласно Лесному Кодексу (ЛК РФ от 04.12.2006 № 200-ФЗ, ред. 30.04.2021), лесные дороги могут создаваться при любых видах использования лесов, а также в целях их охраны, защиты и воспроизводства. Под лесными дорогами в российской практике принято понимать линейные объекты дорожной инфраструктуры. По назначению они подразделяются на *лесовозные лесные дороги* и *лесохозяйственные лесные дороги* (раздел 4, СП 288.1325800.2016. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства). Наличие и состояние лесных дорог, как отмечается в обзоре по проблемам лесопользования (Починков, 2015), продолжает оставаться одним из современных вызовов российского лесного хозяйства и лесозаготовки. Лесные дороги являются неотъемлемой частью лесного участка, для освоения которого необходима двухсоставная лесотранспортная инфраструктура, состоящая из инвестиций и компенсаций. *Инвестиционная* часть представляет собой сеть лесных дорог первой очереди транспортного освоения лесного участка; *компенсационная* – сеть лесных дорог, которая строится на протяжении всего срока транспортного освоения лесного участка. Отмечается, что финансовые ресурсы для развития сети лесных дорог в компенсационной части ежегодно зарабатываются лесозаготовителем

путем реализации заготавливаемой древесины. По мнению автора статьи (Починков, 2015), система финансирования создания лесной инфраструктуры должна включать государственную поддержку лесозаготовителей. Лесной Кодекс РФ (ЛК РФ от 04.12.2006 № 200-ФЗ, ред. от 30.04.2021) не содержит сведений по строительству и содержанию лесных дорог, они находятся вне схем территориального планирования и перечней автодорог регионального и местного значения регионов России.

## 2.2. Геоданные

В качестве источников данных по дорогам общего и специального пользования применяются цифровые и бумажные карты отраслевых региональных подразделений по охране и защите лесов (имеющие, как правило, закрытый характер использования ввиду крупных масштабов отображаемых данных), векторные данные проектов с открытым доступом (например, данные обзорных масштабов Natural Earth, <https://www.naturalearthdata.com>), а также других открытых источников, например Open Street Map, или OSM (<https://www.openstreetmap.org/>), являющийся самым известным проектом с пространственными данными глобального охвата. В классификации дорог OSM есть категория «полевые дороги сельскохозяйственного назначения, лесные дороги, неофициаль-

ные грунтовки», которые обозначаются как track (mostly used for agriculture, forestry, outdoor recreation, and similar activities on open land) и означают в большинстве случаев «направления движения». Сопоставление векторных данных советских карт масштаба 1:200 000 и данных проекта OSM (Podolskaia et al., 2020a) показало, что наименьшие изменения по местоположению за последние 20 лет претерпели автодороги с усовершенствованным покрытием и шоссе.

Проблематика наличия и актуальности данных по лесным дорогам напрямую связана с лесоустройством (ЛК РФ, Статья 67. Общие положения о проведении лесоустройства) и лесной таксацией (ЛК РФ, Статья 69.1. Таксация лесов). Известно, что для таксации необходимы камеральные и полевые работы в соответствии с лесоустроительной инструкцией, дешифрирование космических и аэрофотоснимков для определения количественных и качественных характеристик лесов. Для того чтобы обновить российские материалы лесоустройства, которые характеризуются значительным устареванием во многих регионах (десятки лет), используются документы последнего имеющегося лесоустройства с описанием мероприятий, проведенных с даты последнего лесоустройства, и данные мультиспектральной съемки.

Важной практикой для лесной отрасли в России является то, что предпочтительными материалами по полноте и точности продолжают оставаться оцифрованные листы топографических карт, данные аэрокосмической (в т. ч. БПЛА) съемки, лесоустроительные карты и планшеты; типичный пример для создания слоя дорог в ГИС Красноярского края описан в работе Мохирева и др. (2017). Нерешенными задачами для геоданных лесного хозяйства России остаются актуальность геометрии и атрибутов объектов лесной инфраструктуры, а также качество и подробность геометрического описания цифровых наборов данных в разных регионах страны.

### **2.3. Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)**

Начало применению аэрофотометодов наблюдения в лесном хозяйстве было положено в 40-х гг. XX в., в 70-х годах к ним добавились космические методы и технологии (Абрамова, 2015). Использование аэрофотоснимков и данных космической съемки давно стало традиционным для целей картографической генерализации (Подольская, 2005), обновления содержания карт (Ottichilo, Khamala, 2002) и описания объектов инфраструктуры, отображающихся на картах, в частности дорожной



сети. Много лет для таких операций используются космические снимки, получаемые в оптическом диапазоне спектра (например, Landsat, Spot, Quickbird, Aster и др.). Общепринята актуализация (комплекс работ по обновлению) сведений о лесных дорогах с использованием средств ДЗЗ на основе материалов лесоустройства в ГИС, типичным примером может служить работа Громской и Симоненкова (2016). Важно отметить, что для распознавания дорог и обновления данных по дорогам используются изображения разного пространственного разрешения – от низкодетальных (Oehmcke et al., 2019) до высокодетальных (Yang, Wang, 2007), определение оптимального для лесоустройства пространственного разрешения данных ДЗЗ остается предметом исследования (Gesen, Sarp, 2008). Стала использоваться и радиолокационная съемка, например, системой Sentinel-1 (Abdelfattah, Chokmani, 2017).

В лесохозяйственной деятельности использование данных ДЗЗ условно делят на направление применения снимков как технической основы и как источника вспомогательной информации (Букась и др., 2020). Лесное транспортное моделирование использует общие подходы и методы дешифрирования дорог. Из исторических примеров использования снимков высокого разрешения отметим работу Yang, Wang (2007), использующую морфоло-

гический метод и предлагающую алгоритм выявления осевых линий дорог для дешифрирования дорожной сети по снимкам IKONOS и QuickBird, заменяемых в настоящее время на такие спутниковые материалы, как WorldView и Pleiades. Дешифрирование выполняется по сегментам дорожной сети, применяются инструменты восстановления и удаления погрешностей линий. Ввиду протяженного характера и относительно небольшой ширины, дороги обладают характерными структурными признаками, которые используются для дешифрирования, пример в работе Huang, Zhang (2009). Объектно-ориентированный подход с сегментацией изображения и последующей классификацией объектов дорожной сети, морфологические признаки, использование фильтров составляют методическую основу дешифрирования (Song, Civco, 2004; Du et al., 2016). Методы машинного обучения и нейронные сети определяют технологические возможности дешифрирования в последнее десятилетие (Deeran et al., 2018).

Исследования возможностей использования данных космической съемки для распознавания дорожной сети, типа и состояния дорожного покрытия продолжаются. Современными технологиями обработки данных ДЗЗ достаточно уверенно распознаются дороги общего пользования с покрытием

(автомагистрали и шоссе), к нерешенным задачам относится разработка методов дешифрирования дорог без покрытия (в том числе, лесных и сезонных) и последующей верификации его результатов в условиях местности с сомкнутыми кронами древесной растительности.

### **3. РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЛЕСНОМУ ТРАНСПОРТНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ И ЛЕСНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ**

Исследования по транспортному моделированию и инфраструктуре в лесном хозяйстве ведутся российскими профильными образовательными и научными, в том числе академическими, организациями, расположенными в Санкт-Петербурге, Москве, Мытищах, Пушкине, Петрозаводске и Красноярске. Краткое описание центров дано в Таблице (стр. 11), пояснения с примерами опубликованных работ – в последующем тексте.

*ФБУ ВНИИЛМ* занимается определением и обоснованием лесорастительных зон и лесных районов для реализации требований Лесного кодекса Российской Федерации (ЛК РФ от 04.12.2006 № 200-ФЗ, ред. от 30.04.2021), а также анализом состояния и динамики лесов России, составлением схем лесного районирования (Кашпор и др., 2011). Оценке доступно-

сти лесов посвящена работа коллектива авторов (Желдак и др., 2021), выделяющая и обосновывающая транспортно-технический комплекс.

Помимо транспорта, специалисты *Лаборатории лесоводства и управления лесами* указывают на два других комплекса факторов и условий, а именно: «природные породно-продуктивные, лесовоспроизводительные, лесоэкологические» и «социально-эколого-экономические». Предложенные комплексы показывают обеспеченность техническими средствами для лесопользования и содержания лесов, а также наличие промышленности по переработке древесины.

Методика и механизм проведения экономической оценки и оценки доступности древесных ресурсов на основе рентной оплаты, представленные в работе Н. П. Чупрова (2004), получила свое продолжение в исследовании коллектива авторов «Методика определения экономической доступности лесных ресурсов» (Воронков и др., 2011).

В последние годы была предложена концепция современного лесоустройства (Моисеев, 2017), которая предполагает восстановление полного цикла лесостроительных работ, включая учет лесов, анализ прошлого лесного хозяйства, организацию и планирование использования и воспроизводства лесов на территории субъекта

Таблица. Российские научные институты и вузы, работающие по тематике лесного транспортного моделирования

Организация	Web-ссылки	Ключевые слова
<i>Научные организации</i>		
Федеральное агентство лесного хозяйства, Федеральное бюджетное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФБУ ВНИИЛМ)	<a href="http://www.vniilm.ru/index.php/ru/">http://www.vniilm.ru/index.php/ru/</a>	лесные ресурсы, экономическая оценка, рента, доступность; экономическая оценка доступности древесных ресурсов; расчет экономических показателей; лесное хозяйство, лесоуправление, лесоустройство, непрерывное неистощительное пользование лесом (ННПЛ), устойчивое лесопользование, управление лесами
Карельский научно-исследовательский институт лесопромышленного комплекса, научное подразделение Петрозаводского государственного университета (КарНИИЛПК ПетрГУ), преобразован в Инжиниринговый центр ПетрГУ	<a href="http://engineering.petrso.ru/">http://engineering.petrso.ru/</a>	транспортно-энергетическая инфраструктура; лесопользование, Республика Карелия (Шукин, 2009); импортозамещение; промышленный инжиниринг
Федеральное государственное учреждение ФГУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства»	<a href="http://spb-niilh.ru/scientific-activities/directions/forest-fire-detection">http://spb-niilh.ru/scientific-activities/directions/forest-fire-detection</a>	оптимальное размещение; лесопожарные формирования; критерий оптимальности, минимальное значение суммы затрат и ущерба
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН)	<a href="http://cepl.rssi.ru/transport-modeling/">http://cepl.rssi.ru/transport-modeling/</a>	транспортная доступность, расположение ПХС, лесные пожары, лесные ресурсы, барьерные и безбарьерные сценарии движения, наземный доступ
<i>Вузы</i>		
Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана (МГУЛ)	<a href="https://mf.bmstu.ru/info/faculty/lt/caf/lt3/">https://mf.bmstu.ru/info/faculty/lt/caf/lt3/</a>	лесная таксация, лесоустройство, лесопользование, дистанционное зондирование Земли, экономическая оценка лесных ресурсов, экономическая доступность лесных участков
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет» (ФГБОУ ВО ПетрГУ)	<a href="https://petrsu.ru/structure/487/kafedratekhnologiiio">https://petrsu.ru/structure/487/kafedratekhnologiiio</a> ; <a href="https://petrsu.ru/structure/487/kafedratekhnologiiio/publication/12">https://petrsu.ru/structure/487/kafedratekhnologiiio/publication/12</a>	транспорт леса, оптимизация, лесовозные автопоезда, моделирование движения, эффективность, анализ стоимости лесовозных дорог; затраты; строительство лесовозных дорог; импортозамещение
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский Государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (СПбГЛТУ)	<a href="https://spbftu.ru/">https://spbftu.ru/</a>	пространственно-временная динамика; лесной фонд, лесопользование; Европейская часть России

административно-территориального деления РФ, его лесничеств, расчет ННПЛ, а также оценку затрат, доходов и эффективности проводимых мероприятий. Для перечисленных работ необходима разработка нормативно-правовых положений лесоустройства.

ЦЭПЛ РАН расширяет опыт решения транспортной задачи наземного доступа специальной техники от проблематики наземного доступа к лесным пожарам к лесным ресурсам. Лаборатория мониторинга лесных экосистем ведет исследования по изучению транспортной доступности лесов, занимаясь методической и технологической проработкой построения и использования моделей транспорта в 2D и 3D-вариантах (с учетом уклона земной поверхности) и оценкой пространственного расположения ПХС для модельных территорий России. Строятся маршруты движения специального транспорта, определяется доступ к лесным пожарам и ресурсам леса по времени, скорости и длине с учетом актуальных требований российских норм лесной отрасли (Подольская и др., 2019; Podolskaia et al., 2020c).

Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана (МГУЛ) представлен исследованиями Кафедры ЛТЗ «Лесоправление, лесоустройство и геоинформационные системы». В работе Каракчиевой и Чумаченко (2016) авторы отмечают, что разработанная система

оценки доходности древесных ресурсов леса требует продолжения апробации в регионах России с разными условиями, в том числе и транспортными. С изменениями транспортной ситуации региона наряду с такими связанными показателями, как экономика и размещение производства, возможны изменения экономической доступности лесного участка. Описана автоматизированная информационная система, одним из блоков которой является анализ транспортной инфраструктуры. Он состоит в (1) определении расстояния и среднего расстояния вывозки и (2) последующего расчета затрат на вывозку единицы объема по лесовозным дорогам по схеме «лесосека — нижний склад — потребитель». Транспортировка ресурсов леса показана как расчетный элемент, находящийся в системе оценки доходности лесного участка. В модели ценообразования лесоматериалов используется следующий порядок: «лесосека» — «верхний и нижний склады» (соответственно, у лесной дороги и у дороги общего пользования) — «склады потребителя и производителя» (соответственно, лесоматериалов и пиломатериалов).

Кафедра технологии и организации лесного комплекса в Институте лесных, горных и строительных наук ПетрГУ представлена группой работ (Кузнецов, Иванова, 2012; Шегельман и др., 2015; Кузнецов и др., 2017;

Скрыпник и др., 2019), которые охватывают такие практические вопросы транспортных операций, как расчеты при планировании и оптимизации движения транспорта, снижение затрат на транспортно-переместительные операции в лесозаготовительных работах. В работе Кузнецова и Ивановой (2012) проведен анализ затрат по строительству лесовозных дорог на основе методики с изменением динамики цен магистралей, веток и усов в разные временные интервалы; полученные количественные данные будут способствовать повышению прибыли лесозаготовительных предприятий. Исследование Шегельмана и др. (2015) посвящено расчетам и обоснованию обновления парка лесовозных автопоездов для предприятия ЗАО «Шуялес»; показана целесообразность использования автопоездов на базе МАЗ-6312В9 (пример импортозамещения для российского лесовозного транспорта), для которого получены следующие значения скоростей движения (в грузовом и порожнем направлениях): лесовозная магистраль – 33.52 и 42 км/ч, на ветке – 25.2 и 33.6 км/ч, по дорогам общего пользования – 62 и 73 км/ч. Продолжение в статье Кузнецова и др. (2017) описывает совершенствование автопоезда на базе МАЗ за счет повышения его проходимости при использовании активного прицепа, схема запатентована авторами. Работа Скрып-

ника и др. (2019) посвящена расчетам скорости и времени движения лесовозных автопоездов для их эксплуатации на дорогах общего пользования, лесовозных дорогах и временных усах.

Разработкой теории лесного хозяйства занимается СПбГЛТУ. Так, вопросам проектирования лесных дорог и лесотранспортной инфраструктуре посвящены сборники материалов конференций 2018–2020 гг., в частности «Леса России...» (2019), серия работ (Кузминых, Грязнов, 2017; Антонова, Тюрин, 2017) и учебное пособие (Тюрин и др., 2013). В статье Громской и Симоненкова (2016) подчеркивается необходимость моделирования и оптимизации трасс лесных дорог для долгосрочного планирования лесопользования, а также моделирование и оптимизация лесосечных работ и последовательности транспортного освоения в определенной временной перспективе. Задача транспортного освоения арендуемых лесных участков лесопромышленного предприятия состоит в том, чтобы подобрать лесосечный фонд в рубку на срок до 10 лет на основе проекта освоения лесов и стратегического плана лесных дорог. Работа по совершенствованию существующей структуры лесотранспортной сети Усть-Илимского ЛПК (Моисеева, Тюрин, 2018) использует логистическую модель оптимизации расположения лесотранспортных путей и критерий

минимальных затрат, на основе которых проведен вычислительный эксперимент. Зона тяготения лесных грузов является основным параметром структуры сети дорог. Полученный вариант лесотранспортной сети рекомендован для внедрения. Так моделирование на основе существующих сетей становится основой для рекомендаций для их совершенствования.

Помимо указанных в таблице групп исследователей, географию работ расширяют их учебные и научно-производственные филиалы и кластеры, в частности Красноярский лесной научный кластер (Котельников и др., 2019). Приведем несколько примеров.

Результаты экспертных оценок эффективности противопожарного обустройства лесов при помощи просек и лесных дорог получены в филиале *ФБУ ВНИИЛМ Центр лесной пирологии* в Красноярске, где разрабатываются нормативы оснащенности лесопожарных формирований техническими средствами с учетом лесохозяйственных, природно-климатических, социально-экономических и иных особенностей регионов (Котельников и др., 2017; Котельников и др., 2019). Создаются элементы системы «Цифровой пожар», которая представляет собой пример современного оперативного управления подразделениями при тушении лесного пожара.

*Лесосибирский филиал ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева* представил опыт создания специализированной ГИС для проведения комплексной оценки доступности лесных ресурсов на территории Красноярского края (Мохирев и др., 2017), для которой использованы три укрупненных группы факторов: прибыль, транспортная доступность и стоимость лесохозяйственных работ.

Модель региональной транспортной сети общего пользования (проект находится вне тематики лесной отрасли) и оценки транспортной доступности разрабатывается в *Сыктывкарском лесном институте, филиале СПбГЛТУ* совместно с Министерством экономического развития Республики Коми. Федеральные нормативы по плотности автодорог общего пользования адаптируются для Республики, на муниципальный уровень переносятся сложившиеся пропорции в региональной транспортной системе с учетом анализа размещения населения конкретного района.

Как показано в приведенных описаниях, у каждой научной и образовательной организации сложилась своя тематическая специализация в решении транспортных лесных вопросов. Общим среди российских научных институтов является понимание комплексного характера транспортной до-



ступности лесов и необходимости рассмотрения ее экологических и экономических вопросов, основное внимание уделяется экономической оценке ресурсов леса, практическим расчетам эффективности лесозаготовки с точки зрения транспортных перемещений (машины и инфраструктура дорог разного типа). Новым направлением стало обоснование технологического перехода на импортозамещающие типы лесовозных автомашин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных источников, международных проектов и направлений транспортного моделирования для обеспечения наземного доступа к лесным пожарам и в целях управления ресурсами леса, в которых работают современные исследователи, в особенности российские, позволяет говорить о том, что это направление продолжает оставаться актуальным. В транспортном лесном моделировании развиваются прикладные области на стыке или стыках нескольких наук, таких как, например, экономика и экология. В предлагаемом обзоре было использовано примерно равное количество работ отечественных (преимущественно для описания современного российского тематического «лесного» опыта) и зарубежных (для транспортного моделирования в целом) авторов.

Современное пространственное положение зоны наземной охраны российских лесов должно быть исследовано на предмет возможного изменения с точки зрения транспортного доступа, как наземного, так и авиационного, к лесным пожарам. Обновление данных по инфраструктуре дорог общего пользования и лесных дорог также должно стать темой для изучения в российской практике лесного хозяйства. Этим темам посвящены работы, ведущиеся в Лаборатории мониторинга лесных экосистем ЦЭПЛ РАН.

Учет пространственных сезонных и административных барьеров, необходимость оптимизации размещения ПХС (для доступа к лесным пожарам), лесосек и складов разных уровней (для доступа к ресурсам леса), сценарное моделирование определяют новые возможности для решения транспортной задачи перемещения сил и средств по дорогам общего пользования, лесным дорогам и просекам. Перспективным направлением является поиск методов, подходов и технологических геоинформационных решений определения и сохранения баланса между антропогенной инфраструктурной нагрузкой и природной устойчивостью лесных экосистем для модельных территорий России. Такими территориями могут быть как субъекты административного деления с постоянной многолетней пожарной опасностью (например, ре-

гионы Сибири), так и регионы центра и северо-запада страны.

С методической, технологической и нормативной точек зрения необходимо сохранять определенную регулярность подготовки подобных обзоров с проведением глубокого анализа и выявлением пробелов в знаниях. Наряду с отмеченной спецификой лесного хозяйства, представленный в статье обобщенный опыт отражает законо-

мерности современной прикладной геоинформатики.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках контракта с государственным финансированием «Методические подходы к оценке структурной организации и функционированию лесных экосистем», номер государственной регистрации – АААА-А18-118052590019-7.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова Л. В., Феклистов П. А. Повышение лесоводственной эффективности управления лесным фондом средствами информационных технологий. Архангельск: САФУ, 2015. 171 с.
- Антонова Т. С., Тюрин Н. А. Планирование логистических потоков лесозаготовительного предприятия // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 218. С. 61–71.
- Букась А. В., Кушнырь О. В., Рыбкин А. С., Сидоренков В. М., Бобрецов А. А. Нормативные аспекты и потенциальные объемы использования материалов дистанционного зондирования Земли из космоса как основа информационного обеспечения лесного хозяйства // ДЗЗ в России. № 3. 2020. С. 64–74.
- Воронков П. Т., Воронков А. П., Дудина Е. А., Пугаев А. С. Методика определения экономической доступности лесных ресурсов. Пушкино: ВНИИЛМ, 2011. 42 с.
- Главацкий Г. Д. Обоснование критериев оценки уровня охраны лесов от пожаров // Лесной вестник. 2000. № 3. С. 87–101.
- Громская Л. Я., Симоненков М. В. Современное состояние моделирования и оптимизации лесных дорог // Лесной журнал. 2016. № 5. С. 108–122.
- Дабиев Д. Ф., Дабиева У. М. Оценка транспортной инфраструктуры макрорегионов России // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 11–2. С. 283–284.
- Дубовик В. О. Методы оценки транспортной доступности территории // Региональные исследования. 2013. № 4 (42). С. 11–18.

- Ефремов М. А. Транспортная доступность лесов как главный фактор использования лесных ресурсов // Вестник Волжского государственного университета технологий. 2009. № 1. С. 60–65.
- Желдак В. И., Дорощенко Э. В., Сидоренкова Е. М., Липкина Т. В., Прока И. Ю. Систематизация и учет факторов и условий доступности лесов для осуществления лесоводческой деятельности // Лесохозяйственная информация. 2021. № 1. С. 18–39.
- Каракчиева И. В., Чумаченко С. И. Система оценки экономической доходности древесных ресурсов леса и экономической доступности лесных участков // Фундаментальные исследования. 2016. № 7–2. С. 372–377.
- Кашпор Н. Н., Мартынюк А. А., Желдак В. И., Сидоренков В. М., Трушина И. Г., Кудряшов П. В., Солонцов О. Н. Схема лесного районирования Российской Федерации // Лесной вестник. 2011. № 3 (79). С. 17–25.
- Котельников Р. В., Верховец С. В., Агеев А. А. Красноярский кластер лесной науки – новый этап развития // Лесохозяйственная информация. 2019. № 3. С. 156–166. DOI 10.24419/LNI.2304-3083.2019.3.13
- Котельников Р. В., Коршунов Н. А., Гиляев Н. М. Задачи принятия решений в области охраны лесов от пожаров: основные приоритеты развития информационного обеспечения // Сибирский лесной журнал. 2017. № 5. С. 18–24.
- Кузминых Ю. В., Грязнов С. Е. Лесной комплекс России в обеспечении национальных обязательств Парижского климатического соглашения // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 221. С. 6–20.
- Кузнецов А. В., Иванова О. А. Методика оценки затрат на строительство и эксплуатацию лесовозных дорог // Наука и бизнес: пути развития. Тамбов: Фонд развития науки и культуры. 2012. Вып. 7. № 13. С. 83–85.
- Кузнецов А. В., Скрипник В. И., Васильев А. С., Шегельман И. Р. Возможности эффективного решения технико-экономических инженерных задач при планировании и оптимизации работы транспорта леса // Инженерный вестник Дона. Ростов-на-Дону, 2017. Т. 45. Вып. 2. С. 62.
- Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IV научно-технической конференции. С.-Петербург. 22–25 мая 2019. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 449 с.
- Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 02.07.2021). (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2021). 2021. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64299/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/) (дата обращения 28.08.2021).

- Логонов П. В., Зацепин А. Н., Павлов В. А. Особенности разработки региональных транспортных моделей // Транспортное планирование и моделирование: сборник трудов Международной научно-практической конференции. 26–27 мая 2016 г. С. 57.
- Лукина Н. В., Гераськина А. П., Горнов А. В., Шевченко Н. Е., Куприн А. В., Чернов Т. И., Чумаченко С. И., Шанин В. Н., Кузнецова А. И., Тебенькова Д. Н., Горнова М. В. Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований // Вопросы лесной науки. Т. 3. № 4. 2020. С. 1–90. DOI 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90
- Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Ершов Д. А., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.
- Майоров И. Г., Третьяков А. Г. Экономическая доступность лесных ресурсов и транспортная доступность // Экономика и управление. 2014. № 10 (119). С. 24–28.
- Мальшева Н. В. Картографическое обеспечение государственного учета лесного фонда с использованием ГИС // Лесное хозяйство. 2007. № 3. С. 40–42.
- Мартынюк А. А., Сидоренков В. М., Дорощенкова Э. В., Сидоренков Е. М., Захаров Ю. Г. Зонирование территории Российской Федерации по интенсивности лесного хозяйства и лесопользования // Сибирский лесной журнал. 2016. № 1. С. 3–12. DOI: 10.15372/SJFS20160101
- Моисеев Н. А. О концепции современного лесоустройства в России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 219. С. 58–73.
- Моисеева К. С., Тюрин Н. А. Совершенствование структуры лесотранспортной сети Усть-Илимского ЛПК // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2017. СПб: СПбГЛТУ, 2018. С. 152–162.
- Мохирев А. П., Позднякова М. О., Резинкин С. Ю., Мамматов В. О. Оценка доступности лесных ресурсов с использованием современных методик на базе географических информационно-аналитических систем // Лесотехнический журнал. № 4. 2017. С. 109–121.
- Подольская Е. С. Применение космических сканерных снимков для объективизации картографической генерализации на обзорно-топографических картах // Изв. вузов. Сер.

- Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 5. С. 83–96.
- Подольская Е. С., Ковганко К. А., Ершов Д. В., Шуляк П. П., Сучков А. И.* Использование модели транспортной сети региона для оценки времени и расстояния наземной доставки сил и средств до лесных пожаров // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2. № 1. С. 1–28.
- Положение о пожарно-химических станциях. Приказ от 19 декабря 1997 года № 167. 1997. URL: <http://docs.cntd.ru/document/58817250/> (дата обращения 28.08.2021).
- Починков С. В.* Проблемы российского лесопользования. Вологда, 2015. 359 с.
- Свод правил СП 288.1325800.2016. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства (с изменением № 1). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2017. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069592> (дата обращения 13.11.2021).
- Семёнов В. В., Ермаков А. В.* Исторический анализ моделирования транспортных процессов и транспортной инфраструктуры // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2015. № 3. 36 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-3> (дата обращения 28.08.2021).
- Скрипник В. И., Кузнецов А. В., Питухин Е. А.* Вывод расчетных зависимостей для определения скорости и времени движения лесовозных автопоездов на базе автомобилей с гидромеханической трансмиссией // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3. С. 70–76.
- Соколов В. А.* Проблемы развития лесного комплекса России // Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Красноярск, 26–31 августа 2019 г. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2019. С. 413–415.
- Третьяков А. Г.* Экономическая доступность лесных ресурсов и транспортная логистика // Вестник Петрозаводского Государственного Университета. 2015. № 2 (26). С. 63–69.
- Тюрин Н. А., Громская Л. Я., Антонова Т. С.* Проектирование лесотранспортной инфраструктуры: учебное пособие для вузов. СПб.: СПбГЛТУ. 2013. 112 с.
- Чупров Н. П.* К методике экономической оценки и доступности древесных ресурсов леса // ИВУЗ, Лесной журнал. 2004. № 6. С. 103–108.
- Шегельман И. Р., Скрипник В. И., Кузнецов А. В., Васильев А. С.* Анализ эффективности лесовозного автотранспорта в реальных природно-производственных условиях // Инженерный вестник Дона. Ростов-на-Дону. 2015. № 4. С. 1–12.
- Щукин П. О.* Транспортно-энергетическая инфраструктура лесопользования в Карелии // Лесные ресурсы таежной



- зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления: Материалы Всеросс. науч. конф. с международ. участием. 30.09–03.10.2009. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 106–107.
- Якушева Т. В.* Комплексная оценка доступности лесных ресурсов с учетом развития транспортной инфраструктуры на территории Северо-Западного федерального округа // Известия вузов. Лесной журнал. 2014. № 5. С.113–117.
- Abdelfattah R., Chokmani K.* A semi-automatic off-roads and trails extraction method from Sentinel-1 data // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2017. P. 3728–3731.
- Akay A. E.* Analyzing the effects of logging truck sizes on transportation costs of forest products // V. Science Technology and Innovation Congress. 17–21 April 2019, Alanya, Antalya, pp. 29–36.
- Akay A. E.* Determination of the Safest Route for Logging Trucks Based on Road Types and Conditions // Environ. Sci. Proc. 2021. 3. 5. DOI: 10.3390/IECF2020-08068
- Akay A. E., Karaş I. R., Kahraman I.* Determining the locations of potential firefighting teams by using GIS techniques // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W9, International Conference on Geomatics and Geospatial Technology, Kuala Lumpur, Malaysia, 3–5 September 2018.
- Akay A. E., Serin H., Sessions J., Bilici E., Pak M.* Evaluating the Effects of Improving Forest Road Standards on Economic Value of Forest Products // Croatian Journal of Forest Engineering. 2020. Vol. 42. P. 17. DOI: 10.5552/crojfe.2021.851
- Akay A. E., Wing G. M., Sivrikaya F., Sakar D.* A GIS-based decision support system for determining the shortest and safest route to forest fires: a case study in Mediterranean Region of Turkey // Environmental Monitoring and Assessment. 2012. Vol. 184. No. 3. P. 1391–1407.
- Akay A. E., Zengin M., Köse O., Yenilmez N.* Evaluating Locations of Forest Fire Fighting Teams by Using GIS Techniques // VI International Symposium on Ecology and Environmental Problems. 2011. 17–20 November, Antalya, Turkey. P. 114.
- Alazab A., Venkatraman S., Abawajy J., and Alazab M.* An optimal transportation routing approach using GIS-based dynamic traffic flows // 3<sup>rd</sup> International Conference on Information and Financial Engineering IPEDR. 2011. Vol. 12. P. 172–178.
- Bezrukova T. L., Tereshkina T. R., Nesterov S. Y., Kuksova I. V., Pecherskaya O. A.* Management of transport and logistic infrastructure of the territory: method-



- ological tools and their improvement // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 817. P. 1–8. DOI:10.1088/1757-899X/817/1/012004
- Chen X., Jia P.* A comparative analysis of accessibility measures by the two-step floating catchment area (2SFCA) method // International Journal of Geographical Information Science. 2019. No. 33 (9), pp. 1–20, DOI: 10.1080/13658816.2019.1591415
- Chen Zh., Li Y., Wang P.* Transportation accessibility and regional growth in the Greater Bay Area of China // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2020. Vol. 86. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102453
- Deepan P., Abinaya S., Haritha G., Iswarya V.* Road recognition from remote sensing imagery using machine learning // International Research Journal of Engineering and Technology 2018. Vol. 5. No. 3. P. 3677–3683.
- Drobnjak S., Sekulović D., Amović M., Gigović L., Regodić M.* Central geospatial database analysis of the quality of road infrastructure data // Geodetski Vestnik. 2016. Vol. 60. No. 2. P. 269–284. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2016.02
- Du Yu., Li J., Wang Y.* An integrated method for road network centerline detection from multispectral imagery // Springer International Publishing AG. 2016. H. Yin et al. (Eds.): IDEAL 2016. LNCS 9937. P. 332–341.
- Dunn Ch. J., Thompson M. P., and Calkin D. E.* A framework for developing safe and effective large-fire response in a new fire management paradigm // Forest Ecology and Management. 2017. 404. P. 184–196.
- Gecen R., Sarp G.* Road detection from high- and low-resolution satellite images // The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2008. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing. P. 355–357.
- Goldamm J. G., Eritsov A. M., Kisilyakhov E. K.* The need for development of pragmatic and science-based solutions for forest management and fire management for the Russian Federation // Siberian Forest Magazine. 2017. No. 5. P. 114–124.
- Horni A., Nagel K. and Axhausen K. W. (eds.)* The Multi-Agent Transport Simulation MATSim // London: Ubiquity Press. 2016. DOI: 10.5334/baw.
- Huang X., Zhang L.* Road centreline extraction from high-resolution imagery based on multiscale structural features and support vector machines // International Journal of Remote Sensing. 2009. Vol. 30. No. 8. P. 1977–1987.
- Ibisch P. L., Hoffmann M. T., Kreft S., Pe'er G., Kati V., Biber-Freudenberger L., Della Sala D. A., Vale M. M., Hobson P. R., Selva N.* A global map of roadless areas and their conserva-

- tion status // *Science*. 2016. Vol. 16. No. 354 (6318). P. 1423–1427.
- Krumov T.* Determination of the optimal density of the forest road network // *Journal of Forest Science*. 2019. Vol. 65. No. 11. P. 1–8.
- Liu S., Zhu X.* Accessibility Analyst: an integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning // *Environment and Planning B. Planning and Design*. 2004. Vol. 31. P. 105–124.
- Loidl M., Wallentin G., Cyganski R., Graser A., Scholz J., and Haslauer E.* GIS and Transport Modeling – Strengthening the Spatial Perspective // *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2016. 5. P. 84.
- Lovelace R.* Open source tools for geographic analysis in transport planning // *Journal of Geographical System*. 2021. Vol. 23. P. 547–578.
- Malladi T., Sowlati T.* Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review // *International Journal of Forest Engineering*. 2017. Vol. 28. No. 3. P. 198–210.
- Nelson A.* Estimated travel time to the nearest city of 50,000 or more people in year 2000. Global Environment Monitoring Unit – Joint Research Centre of the European Commission // *Ispra Italy*. 2008. <https://fo-robots.jrc.ec.europa.eu/products/gam/> (August 28, 2021)
- Oehmcke S., Thrysoe C., Borgstad A., Vaz Salles M. A., Brandt M., Gieseke F.* Detecting Hardly Visible Roads in Low-Resolution Satellite Time Series Data // *IEEE conference*. 2019. <https://arxiv.org/pdf/1912.05026.pdf> (August 28, 2021)
- Ottichilo W., E. Khamala E.* Map updating using high-resolution satellite imagery: a case study of the kingdom of Swaziland // *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2002. Vol. XXXIV. Part 6/W6. P. 89–92.
- Petrov V. N., Katkova T. E., Karvinen S.* Trends in the development of forestry in Russia and Finland // *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2019. Vol. 12. No. 3. P. 140–157.
- Podolskaia E., Ershov D., Kovganko K.* GIS-analysis of ground transport accessibility of fire stations at regional scale // *Abstr. Int. Cartogr. Assoc.* 1. 2019. P. 301.
- Podolskaia E., Ershov D., Kovganko K.* Comparison of data sources on transport infrastructure for the regional forest fire management // *Reyer, C., Bilogub, M., Mahnken, M., Gutsch, M., Kruger, K., Ramming, A., Reineking, B., Seidl, R., Schelhaas M.-J., Makela, A., Verkerk, H. (Eds.) Managing forests in the 21<sup>st</sup> century: Book*

of abstracts, Managing forests in the 21<sup>st</sup> century. Conference at the Potsdam Institute for Climate Impact Research. Potsdam. 2020a. 59 p. DOI: org/10.2312/pik.2020.002

Podolskaia E., Ershov D., Kovganko K. Automated construction of ground access routes for the management of regional forest fires // J. For. Sci. 2020b. Vol. 66. P. 329–338.

Podolskaia E., Ershov D., Kovganko K. GIS-Approach to Estimate Ground Transport Accessibility of Forest Resources (Case Study: Novosibirsk Region, Siberian Federal District, Russia) // Journal of Geographic Information System, 2020c. Vol. 12. P. 451–469.

Song M., Civco D. Road Extraction Using SVM and Image Segmentation // Ph. Eng. and Rem. Sens. 2004. Vol. 70. No. 12. P. 1365–1371.

Yang J., Wang R. S. Classified Road detection from satellite images based on perceptual organization // International Journal of Remote Sensing. 2007. Vol. 28. P. 4653–4669.

Weiss D., Nelson A., Gibson H., Temperley W., Peedell S., Lieber A., ... & Gething P. W. A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility in 2015 // Nature. 2018. Vol. 553. P. 333–336.

Wenz L., Weddige U., Jakob M., Steckel J. C. Road to glory or highway to hell? Global road access and climate

change mitigation // Environmental Research Letters. 2020. Vol. 15. DOI: 10.1088/1748-9326/ab858d

## REFERENCES

Abdelfattah R., Chokmani K., A semi-automatic off-roads and trails extraction method from Sentinel-1 data, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2017, pp. 3728–3731.

Abramova L. V., Feklistov P. A., *Povyshenie lesovodstvennoj jeffektivnosti upravlenija lesnym fondom sredstvami informacionnyh tehnologij: monografija* (Improving the forestry efficiency of forest fund management by means of information technologies: a monograph), Arhangel'sk: SAFU, 2015, 171 p.

Akay A. E., Analyzing the effects of logging truck sizes on transportation costs of forest products, *V Science Technology and Innovation Congress*, 17–21 April 2019, Alanya, Antalya, pp. 29–36.

Akay A. E., Determination of the Safest Route for Logging Trucks Based on Road Types and Conditions, *Environ. Sci. Proc.*, 2021, Vol. 3, No. 5, DOI: 10.3390/IECF2020-08068

Akay A. E., Karaş I. R., Kahraman I., Determining the locations of potential firefighting teams by using GIS techniques, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W9,

- International Conference on Geomatics and Geospatial Technology*, Kuala Lumpur, Malaysia, 3–5 September 2018.
- Akay A. E., Serin H., Sessions J., Bilici E., Pak M., Evaluating the Effects of Improving Forest Road Standards on Economic Value of Forest Products, *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2020, Vol. 42, p. 17, DOI: 10.5552/crojfe.2021.851
- Akay A. E., Wing G. M., Sivrikaya F., Sakar D. A., GIS-based decision support system for determining the shortest and safest route to forest fires: a case study in Mediterranean Region of Turkey, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, Vol. 184. No. 3, pp. 1391–1407.
- Akay A. E., Zengin M., Köse O., Yenilmez N., Evaluating Locations of Forest Fire Fighting Teams by Using GIS Techniques, *VI International Symposium on Ecology and Environmental Problems*, 2011, 17–20 November, Antalya, Turkey, p. 114.
- Alazab A., Venkatraman S., Abawajy J., and Alazab M., An optimal transportation routing approach using GIS-based dynamic traffic flows, *3<sup>rd</sup> International Conference on Information and Financial Engineering IPEDR*, 2011, Vol. 12, pp. 172–178.
- Antonova T. S., Tjurin N. A., Planirovanie logisticheskikh potokov lesozagotovitel'nogo predpriyatija (Logistics planning for a logging company), *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2017, Vol. 218, pp. 61–71.
- Bezrukova T. L., Tereshkina T. R., Nesterov S. Y., Kuksova I. V., Pecherskaya O. A., Management of transport and logistic infrastructure of the territory: methodological tools and their improvement, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, No. 817, pp. 1–8.
- Bukas' A. V., Kushnyr' O. V., Rybkin A. S., Sidorenkov V. M., Bobrecov A. A., Normativnye aspekty i potencial'nye ob#emy ispol'zovanija materialov distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa kak osnova informacionnogo obespechenija lesnogo hozjajstva (Regulatory aspects and potential volumes of the Earth remote sensing space materials' use as a basis for information forestry support), *DZZ v Rossii*, 2020, No. 3, pp. 64–74.
- Chen X., Jia P., A comparative analysis of accessibility measures by the two-step floating catchment area (2SFCA) method, *International Journal of Geographical Information Science*, No. 33 (9), pp. 1–20.
- Chen Zh., Li Y., Wang P., Transportation accessibility and regional growth in the Greater Bay Area of China, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, Vol. 86. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102453
- Chuprov N. P., K metodike jekonomicheskoy ocenki i dostupnosti drevesnyh resursov lesa (To the methodology of an economic assessment and availability of

- wood forest resources), *Lesnoj zhurnal*, 2004, No. 6, pp. 103–108.
- Dabiev D. F., Dabieva U. M., Ocenka transportnoj infrastruktury makroregionov Rossii (Assessment of transport infrastructure of Russian macro regions), *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, 2015, No. 11–12, pp. 283–284.
- Deepan P., Abinaya S., Haritha G., Iswarya V., Road recognition from remote sensing imagery using machine learning, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 5, No. 3, March 2018, pp. 3677–3683.
- Drobnjak S., Sekulović D., Amović M., Gigović L., Regodić M., Central geospatial database analysis of the quality of road infrastructure data, *Geodetski Vestnik*, June 2016, pp. 269–284.
- Du Yu., Li J., Wang Y., *An integrated method for road network centerline detection from multispectral imagery*, Springer International Publishing AG, 2016, H. Yin et al. (Eds.): IDEAL 2016, LNCS 9937, pp. 332–341.
- Dubovik V. O., Metody ocenki transportnoj dostupnosti territorii (Assessment of territory transport accessibility), *Regional'nye issledovanija*, 2013, Vol. 42, No. 4, pp. 11–18.
- Dunn Ch. J., Thompson M. P., Calkin D. E., A framework for developing safe and effective large-fire response in a new fire management paradigm, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 404, pp. 184–196.
- Efremov M. A., Transportnaja dostupnost' lesov kak glavnyj faktor ispol'zovanija lesnyh resursov (Transport accessibility of forests as the main factor in forest resources' use), *Vestnik Volzhskogo gosudarstvennogo universiteta tehnologij*, 2009, No. 1, pp. 60–65.
- Gecen R., Sarp G., Road detection from high- and low-resolution satellite images, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, Vol. XXXVII, Part B4, Beijing, pp. 355–357.
- Glavackij G. D., Obosnovanie kriteriev ocenki urovnja ohrany lesov ot pozharov (Justification of criteria for assessing the level of forest protection from fires), *Lesnoj Vestnik*, 2000, No. 3, pp. 87–101.
- Goldamm J. G., Eritsov A. M., Kisilyakhov E. K., The need for development of pragmatic and science-based solutions for forest management and fire management for the Russian Federation, *Siberian Forest Magazine*, 2017, Vol. 5, pp. 114–124.
- Gromskaja L. Ja., Simonenkov M. V., Sovremennoe sostojanie modelirovanija i optimizacii lesnyh dorog (The current state of modeling and optimization of forest roads), *Lesnoj zhurnal*, 2016, No. 5, pp. 108–122.
- Horni A., Nagel K. Axhausen K. W., *The Multi-Agent Transport Simulation MAT-Sim*, London: Ubiquity Press, 2016, DOI: 10.5334/baw.



- Huang X., Zhang L., Road centerline extraction from high-resolution imagery based on multiscale structural features and support vector machines, *International Journal of Remote Sensing*, 2009, Vol. 30 (8), pp. 1977–1987.
- Ibisch P. L., Hoffmann M. T., Kreft S., Pe'er G., Kati V., Biber-Freudenberger L., Della Sala D. A., Vale M. M., Hobson P. R., Selva N., A global map of roadless areas and their conservation status, *Science*, 2016, Vol. 16, No. 354 (6318), pp. 1423–1427.
- Jakusheva T. V., Kompleksnaja ocenka dostupnosti lesnyh resursov s uchetom razvitija transportnoj infrastruktury na territorii Severo-Zapadnogo federal'nogo okruga (Comprehensive assessment of forest resources' availability taking into account the development of transport infrastructure in the North-West Federal District), *Izvestija vuzov. Lesnoj zhurnal*, 2014, No. 5, pp. 113–117.
- Karakchieva I. V., Chumachenko S. I., Sistema ocenki jekonomicheskoj dohodnosti drevesnyh resursov lesa i jekonomicheskoj dostupnosti lesnyh uchastkov (A system for assessing the economic profitability of forest wood resources and the economic accessibility of forest plots), *Fundamental'nye issledovanija*, 2016, No. 7–2, pp. 372–377.
- Kashpor N. N., Martynjuk A. A., Zheldak V. I., Sidorenkov V. M., Trushina I. G., Kudrjashov P. V., Soloncov O. N., She-  
ma lesnogo rajonirovanija Rossijskoj Federacii (Scheme of forest zoning of the Russian Federation), *Lesnoj vestnik*, 2011, No. 3 (79), pp. 17–25.
- Kotel'nikov R. V., Korshunov N. A., Girjaev N. M., Zadachi prinjatija reshenij v oblasti ohrany lesov ot pozharov: osnovnye priority razvitija informacionnogo obespechenija (Decision-making tasks in the field of forest fire protection: main priorities for the development of information support), *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2017, No. 5, pp. 18–24.
- Kotel'nikov R. V., Verhovec S. V., Ageev A. A., Krasnojarskij klaster lesnoj nauki – novyj jetap razvitija (Krasnoyarsk cluster of forest science – a new stage of development), *Lesohozjajstvennaja informacija*, 2019, No. 3, pp. 156–16.
- Krumov T., Determination of the optimal density of the forest road network, *Journal of Forest Science*, 2019, Vol. 65, No. 11, pp. 1–8.
- Kuzminyh Ju. V., Grjaznov S. E., Lesnoj kompleks Rossii v obespechenii nacional'nyh objazatel'stv Parizhskogo klimaticheskogo soglashenija (The Russian Forest complex in ensuring the national obligations of the Paris Climate Agreement), *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoi akademii*, 2017, Vol. 221, pp. 6–20.
- Kuznecov A. V., Ivanova O. A., Metodika ocenki zatrat na stroitel'stvo i jekspluataciju lesovoznyh dorog (Methodology for



- estimating the costs of construction and operation of logging roads), *Nauka i biznes: puti razvitija*. Tambov: Fond razvitija nauki i kul'tury, 2012, Vol. 7, No. 13, pp. 83–85.
- Kuznecov A. V. Skrypnik V. I., Vasil'ev A. S., Shegel'man I. R., *Vozmozhnosti jeffektivnogo reshenija tehniko-jekonomicheskikh inzhenernykh zadach pri planirovanii i optimizacii raboty transporta lesa* (Possibilities of effective solution of technical and economic engineering tasks in planning and optimizing the operation of forest transport), *Inzhenernyj vestnik Dona*. Rostov-na-Donu, 2017, Vol. 45, No. 2, p. 62.
- Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie (Forests of Russia: politics, industry, science, education), *Materialy IV nauchno-tehnicheskoy konferencii*. (IV Scientific and Technical Conference), S.-Peterbourg, 22–25 May 2019, SPb: POLITEH-PRESS, 2019, 449 p.
- Lesnoj kodeks Rossijskoj Federacii* (Forest Code of Russian Federation), 04.12.2006, No. 200-FZ (edition 02.07.2021), in force since 01.09.2021. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64299/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/) (2021, 28 August).
- Liu S., Zhu X., *Accessibility Analyst: an integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning*, *Environment and Planning B. Planning and Design*, 2004, Vol. 31, pp. 105–124.
- Loginov P. V., Zacepin A. N., Pavlov V. A., *Osobennosti razrabotki regional'nyh transportnyh modelej* (Features of the development of regional transport models), *Transportnoe planirovanie i modelirovanie: sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, 26–27 maja 2016, p. 57.
- Loidl M., Wallentin G., Cyganski R., Graser A., Scholz J., and Haslauer E., *GIS and Transport Modeling – Strengthening the Spatial Perspective*, *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, 2016, Vol. 5, p. 84.
- Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Egorov V. A., Ershov D. A., Kobec D. A., Sen'ko K. S., Stycenko F. V., Sychugov I. G., *Sputnikovyj monitoring lesnyh pozharov v 21 veke na territorii Rossijskoj Federacii* (cifry i fakty po dannym detektirovanija aktivnogo gorenija (Satellite monitoring of forest fires in the 21<sup>st</sup> century on the territory of the Russian Federation (figures and facts based on the active burning detection data)), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa* (Current problems in remote sensing of the Earth from space), 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175.
- Lovelace R., *Open source tools for geographic analysis in transport planning*, *Journal of Geographical System*, 2021. Vol. 23, pp. 547–578.
- Lukina N. V., Geras'kina A. P., Gornov A. V., Shevchenko N. E., Kuprin A. V., Chernov T. I., Chumachenko S. I., Shanin V. N., Kuznecova A. I., Teben'kova D. N., Gornova M. V., *Bioraznoobrazie i klimato-*

- regulirujushhie funkcii lesov: aktual'nye voprosy i perspektivy issledovanij (Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects), *Voprosy lesnoj nauki*, 2020, Vol. 3, No. 4, pp. 1–90, DOI 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90
- Maiorov I. G., Tret'jakov A. G., Jekonomicheskaja dostupnost' lesnyh resursov i transportnaja dostupnost' (Economic accessibility of forest resources and transport accessibility), *Jekonomika i upravlenie*, 2014, Vol. 119, No. 10 pp. 24–28.
- Malladi T., Sowlati T., Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review, *International Journal of Forest Engineering*, 2017, Vol. 28. No. 3, pp. 198–210.
- Malysheva N. V., Kartograficheskoe obezpechenie gosudarstvennogo ucheta lesnogo fonda s ispol'zovaniem GIS (Cartographic support of the state accounting of the forest fund using GIS), *Lesnoe hozjajstvo*, 2007, No. 3, pp. 40–42.
- Martynjuk A. A., Sidorenkov V. M., Doroshhenkova Je. V., Sidorenkov E. M., Zaharov Ju. G., Zonirovanie territorii Rossijskoj Federacii po intensivnosti lesnogo hozjajstva i lesopol'zovanija (Zoning of the territory of the Russian Federation according to the intensity of forestry and forest management), *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2016, No. 1, pp. 3–12.
- Moiseev N. A., O koncepcii sovremennogo lesoustrojstva v Rossii (On the concept of modern forest management in Russia), *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*. 2017, Vol. 219, pp. 58–73.
- Moiseeva K. S., Tjurin N. A., Sovershenstvovanie struktury lesotransportnoj seti Ust'-Ilimskogo LPK (Improving the structure of timber transport of the Ust-Ilimsk timber processing plant), *Sbornik statej po materialam nauchno-tehnicheskoy konferencii instituta tehnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauchno-issledovatel'skih rabot 2017* (Collection of articles from the Scientific and technical Conference of the Institute of Technological Machines and Timber Transport, researches of 2017), Saint-Peterbourg: SPbGLTU, 2018, pp. 152–162.
- Mohirev A. P., Pozdnjakova M. O., Rezin'kin S. Ju., Mammatov V. O., Ocenka dostupnosti lesnyh resursov s ispol'zovaniem sovremennyh metodik na baze geograficheskikh informacionno-analicheskikh system (Assessment of forest resources availability by using modern techniques based on the geographic information and analytical systems), *Lesotekhnicheskij zhurnal*, 2017, No. 4, pp. 109–121.
- Nelson A., Estimated travel time to the nearest city of 50,000 or more people in year 2000, *Global Environment Monitoring Unit – Joint Research Centre of*

- the European Commission*, Ispra Italy, 2008, URL: <https://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/gam/> (2021, 28 August).
- Oehmcke S., Thrysoe C., Borgstad A., Vaz Salles M. A., Brandt M., Gieseke F., Detecting Hardly Visible Roads in Low-Resolution Satellite Time Series Data, *IEEE conference*, 2019, URL: <https://arxiv.org/pdf/1912.05026.pdf> (2021, 28 August).
- Ottichilo W., E. Khamala E., Map updating using high-resolution satellite imagery: a case study of the kingdom of Swaziland, *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2002, Vol. XXXIV, Part 6/W6, pp. 89–92.
- Petrov V. N., Katkova T. E., Karvinen S., Trends in the development of forestry in Russia and Finland, *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 140–157.
- Pochinkov S. V., *Problemy rossijskogo lesopol'zovanija* (Problems of Russian forest management), Vologda: 2015, 359 p.
- Podolskaia E. S., Primenenie kosmicheskikh skanernyh snimkov dlja ob#ektivizacii kartograficheskoy generalizacii na obzorno-topograficheskikh kartah (Application of satellite scanner images for the map generalization's objectification on the survey-topographic maps), *Izv. vuzov. Ser. Geodezija i ajerofotos#emka*, 2005, No. 5, pp. 83–96.
- Podolskaia E. S., Kovganko K. A., Ershov D. V., Shuljak P. P., Suchkov A. I., Ispol'zovanie modeli transportnoj seti regiona dlja ocenki vremeni i rasstojanija nazemnoj dostavki sil i sredstv do lesnyh pozharov (Using a model of the region's transport network to estimate the time and distance of ground delivery of forces and equipment to the forest fires), *Vo-prosy lesnoj nauki*, 2019, Vol. 2, No. 1, pp. 1–28, DOI 10.31509/2658-607x-2019-2-1-1-28
- Podolskaia E., Ershov D., Kovganko K., GIS-analysis of ground transport accessibility of fire stations at regional scale, *Abstr. Int. Cartogr. Assoc.*, 1, 2019, p. 301, URL: <https://doi.org/10.5194/ica-abs-1-301-2019> (2021, 28 August).
- Podolskaia E., Ershov D., Kovganko K., Comparison of data sources on transport infrastructure for the regional forest fire management, Reyer, C., Bilogub, M., Mahnken, M., Gutsch, M., Kruger, K., Ramming, A., Reineking, B., Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Makela, A., Verkerk, H. (Eds.), *Managing forests in the 21st century: Book of abstracts, Managing forests in the 21st century, Conference at the Potsdam Institute for Climate Impact Research*. Potsdam, 2020 a, 59 p. DOI: [org/10.2312/pik.2020.002](https://doi.org/10.2312/pik.2020.002)
- Podolskaia E., Ershov D., Kovganko K., Automated construction of ground access routes for the management of regional forest fires, *J. For. Sci.*, 2020 b, Vol. 66, pp. 329–338.
- Podolskaia E., Ershov D., Kovganko K., GIS-Approach to Estimate Ground Trans-

- port Accessibility of Forest Resources (Case Study: Novosibirsk Region, Siberian Federal District, Russia), *Journal of Geographic Information System*, 2020 c, Vol. 12, pp. 451–469.
- Polozhenie o pozharo-himicheskikh stancijah* (Regulations on the fire-chemical stations), Order from 19.12.1997, No. 167, URL: <http://docs.cntd.ru/document/58817250/> (2021, 28 August).
- Semjonov V. V., Ermakov A. V., Istoricheskij analiz modelirovaniya transportnyh processov i transportnoj infrastruktury (Historical analysis of modeling transport processes and transport infrastructure), *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha*, 2015, No. 3, 36 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-3> (2021, 28 August).
- Shegel'man I. R., Skrypnik V. I., Kuznecov A. V., Vasil'ev A. S., Analiz jeffektivnosti lesovoznogo avtotransporta v real'nyh prirodno-proizvodstvennyh uslovijah (Analysis of timber transport's efficiency in the real natural conditions), *Inzhenernyj vestnik Dona*, Rostov-na-Donu, 2015, No. 4, pp. 1–12.
- Shhukin P. O., Transportno-jenergeticheskaja infrastruktura lesopol'zovanija v Karelii (Transport and energy infrastructure of forest management in Karelia), *Lesnye resursy taezhnoj zony Rossii: problemy lesopol'zovanija i lesvosstanovlenija: Materialy Vseross. nauch. konf. s mezhdunarod. uchastiem* (Forest resources of taiga zone in Russia: problems of forest management and reforestation. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation), Petrozavodsk, 30 September – 3 October 2009, Petrozavodsk: KarNC RAN, 2009, pp. 106–107.
- Skrypnik V. I., Kuznecov A. V., Pituhin E. A., Vyvod raschetnyh zavisimostej dlja opredelenija skorosti i vremeni dvizhenija lesovoznyh avtopoezdov na baze avtomobilej s gidromehaničeskoj transmissiej (Derivation of calculated dependencies to determine the speed and time of movement of timber road trains based on the vehicles with hydro-mechanical transmission), *Sovremennye naukoemkie tehnologii*, Moscow, 2019, No. 3, pp.70–76.
- Sokolov V. A., Problemy razvitija lesnogo kompleksa Rossii (Problems of Russian forestry industry's development), *Lesnye jekosistemy boreal'noj zony: bioraznობrazie, biojekonomika, jekologičeskie riski. Materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* (Forest ecosystems of boreal zone: biodiversity, bioeconomics, and environmental risks. Materials of the All-Russian Conference with International Participation), Krasnoyarsk, 26–31 August 2019, Krasnoyarsk: IL SO RAN, 2019, pp. 413–415.
- Song M., Civco D., Road Extraction Using SVM and Image Segmentation, *Ph. Eng. and Rem. Sens*, 2004, Vol. 70 (12), pp. 1365–1371. DOI: 10.14358/PERS.70.12.1365

- Svod pravil SP 288.1325800.2016. Doro- gi lesnye. Pravila proektirovanija i stroitel'stva, s izmeneniem № 1* (Set of rules 288.1325800.2016. Forest roads. Design and construction rules, with amendment No. 1), Oficial'noe izdanie, Moscow: Standardinform, 2017, URL: [https:// docs.cntd.ru/document/456069592](https://docs.cntd.ru/document/456069592) (2021, 28 August).
- Tjurin N. A., Gromskaja L. Ja., Antonova T. S., *Proektirovanie lesotransportnoj infrastruktury: uchebnoe posobie dlja vuzov* (Design of transport infrastructure: a textbook for universities), Saint-Peterbourg: SPbGLTU, 2013. 112 p.
- Tret'jakov A. G., *Jekonomicheskaja dostupnost' lesnyh resursov i transportnaja logistika* (Economic availability of forest resources and transport logistics), *Vestnik Petrozavodskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2015, Vol. 26, No. 2, pp. 63–69.
- Voronkov P. T., Voronkov A. P., Dudina E. A., Pugaev A. S., *Metodika opredelenija jekonomicheskoy dostupnosti lesnyh resursov* (Methodology to determine the economic availability of forest resources), Pushkino: VNIILM, 2011, 42 p.
- Weiss D., Nelson A., Gibson H., Temperley W., Peedell S., Lieber A., ... & Gething P. W., A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility in 2015, *Nature*, 2018, Vol. 553, pp. 333–336.
- Wenz L., Weddige U., Jakob M., Steckel J. C., Road to glory or highway to hell? Global road access and climate change mitigation, *Environmental Research Letters*, 2020, Vol. 15, DOI: 10.1088/1748-9326/ab858d
- Yang J., Wang R. S., Classified Road detection from satellite images based on perceptual organization, *International Journal of Remote Sensing*, 2007, Vol. 28 (20), pp. 4653–4669.
- Zheldak V. I., Doroshhenkova Je. V., Sidorenkova E. M., Lipkina T. V., Proka I. Ju., *Sistematizacija i uchet faktorov i uslovij dostupnosti lesov dlja osushhestvlenija lesovodcheskoj dejatel'nosti* (Systematization and accounting of factors and conditions of forest accessibility for the implementation of forestry activities), *Lesohozhajstvennaja informacija*, 2021, No. 1, pp. 18–39.



## REVIEW OF EXPERIENCE IN SOLVING THE TRANSPORT MODELING TASKS IN THE FORESTRY

**Podolskaia E. S.**

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

E-mail: podols\_kate@mail.ru

Received 30 June 2021

Revised 04 August 2021

Accepted 16 August 2021

The article systematizes the experience of solving the task of transport modeling for the ground access to the forest fires and forest resources, presented by scientific and engineering works. General characteristics of transport modeling based on the Russian and foreign experience are given; the analysis of data services and Open Source developments are the topical subjects in the development of transport projects. The main attention is paid to the review of issues of transport modeling issues in the use, protection, and reproduction of forests, taking into account the current Russian regulatory documents of the forestry. We have described the geodata sources, as well as using remote sensing data of different types and spatial resolution for the transport modeling in the forestry. The works of scientific and educational institutions represent Russian research on the forest transport modeling and forest infrastructure. They have a common understanding of forest transport accessibility as a complex issue. It is noted that the interest of researchers traditionally lies in solving environmental and economic problems of modeling. It is necessary to continue the work on the modeling for the location of fire stations, cutting areas and forest warehouses for the model territories in different regions and of different forest infrastructure's characteristics. The development of methods and technologies to balance the infrastructural load and natural stability of forest ecosystems is described as a direction for further research. Undertaken review shows some patterns of forest transport modeling as a part of forestry using modern applied geoinformatics.

**Key words:** *forestry, transport modeling, transport accessibility, ground access, forest fires, forest resources, forest roads, GIS, Open Source*

**Рецензент:** д. б. н. Чумаченко С. И.