

DOI: 10.31509/2658-607x-202582-167

УДК 614.842; 630*96

СЦЕНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЛЕСНЫХ ДОРОГ: ОБЗОР

© 2025

Е. С. Подольская^{1,2}, Ю. В. Шаталин²

¹Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А. С. Исаева РАН, Россия, 117997 г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» Россия, 101000 г. Москва, ул. Мясницкая, 20

E-mail: podols_kate@mail.ru; y-shatalin@mail.ru

Поступила в редакцию: 30.04.2025

После рецензирования: 26.05.2025

Принята к печати: 02.06.2025

Цель настоящей статьи – обзор и систематизация работ по сценарному моделированию при проектировании лесных дорог на региональном уровне. Задачи работы заключаются: в анализе текущего состояния вопросов лесного транспортного планирования и проектирования; в описании истории, особенностей и преимуществ сценарного моделирования с примерами в лесном комплексе; в изучении применения сценарного моделирования для решений задач лесного комплекса; в обзоре современных инструментов, методов и данных для сценарного лесотранспортного моделирования. По исследованиям России, Австралии, Швеции, Румынии и Финляндии составлена таблица видов сценарного моделирования в применении к проектированию лесных дорог. Графическая часть обзора представлена с использованием нескольких инструментов: облаком слов по названиям статей и упоминаемым географическим названиям, а также диаграммами связности для названий групп российских и зарубежных статей. Среди англоязычных работ (1991-2018 гг.) отмечается больше связности, чем среди российских (1977-2021 гг.), которые представлены кластерами с четкими границами. Анализ цитируемости российских и зарубежных работ показал доминирование последних ввиду того, что они написаны на английском языке и, соответственно, ориентированы на исследователей всего мира, а также ввиду более ранних дат исследований. В заключении отмечено недостаточное количество работ по лесотранспортным сценариям (имеются работы конца 2000-х-начала 2010 гг.) и необходимость использования методов и технологий, ставших доступными в последние годы.

Ключевые слова: сценарии, сценарное моделирование, региональный уровень, лесной комплекс, лесные дороги, ГИС

Транспорт играет разрешительную роль для экономического развития: инвестиции в транспорт способствуют изменению пространственной структуры экономики, созданию новых точек роста (Gauthier, 1970). Одним из ключевых выводов работы (Hesse, Rodrigue, 2004) является взаимосвязь транспортной инфраструктуры и эффективность логистических операций – первое положительно воздействует на второе. Помимо этого, утверждается, что транспорт считается компонентом комплексного спроса, а не производного. В монографии 2020 г. о географии транспортных систем содержатся выводы: 1) в краткосрочной перспективе автомобильный транспорт продолжит быть доминирующим во всей транспортной отрасли; 2) увеличение спроса на транспорт требует существенных инвестиций в инфраструктуру (Rodrigue, 2020).

Развитие транспортной сети способствует росту эффективности освоения новых источников сырья, природных богатств, снижению совокупных издержек в базовых и обслуживающих отраслях экономики на территории, решению социальных проблем, успешной интеграции территориального хозяйственного комплекса в мировую хозяйственно-экономическую систему. Поэтому учёт транспортного фактора необходим в ре-

гиональном планировании. Авторы считают, что транспорт должен рассматриваться как одна из приоритетных отраслей, опережающее развитие и стабильное функционирование которой являются необходимым условием общего экономического роста в условиях рынка. Кроме того, уровень развития транспортной инфраструктуры должен быть сопоставим с общим уровнем развития производственных сил территории, учитывать специфические особенности функционирования региона и потребность элементов хозяйства и населения (Гимади и др., 2005). Таким образом, развитые транспорт и транспортная инфраструктура способствуют экономическому и социальному развитию регионов во всём мире. В российском контексте проблема нехватки качественной транспортной инфраструктуры может отражаться особенно остро из-за наличия отдалённых территорий со сложными природно-климатическими условиями, к которым уместно относить Красноярский край. Анализ сценарного подхода для его применения в различных сферах жизни существовал ещё во второй половине XX в. Однако одной из отправных точек использования сценариев послужила статья 1993 г., в которой осмысливается природа сценариев и происходит сравнение и обобщение имевшихся на тот момент

исследований (Schoemaker, 1993). Примерно в то же время сценарное моделирование полностью сформировалось в методологию стратегического управления, которая основывается на прогнозировании вариантов будущего (Тарасова, 2016).

В одной из статей, использующих сценарии для регионального планирования эти варианты определяются как описание картины будущего с определённой вероятностью достижения. Здесь же отмечается разбиение сценариев на базовый и альтернативные (Овешникова, 2014). Схожее определение даётся в другой статье российских авторов – модель будущего, в которой описывается возможный ход событий с указанием вероятностей их реализации на основе определённых факторов. Отдельно указывается, что в сценарном прогнозе нет единого верного и/или желаемого варианта будущего. Кроме того, сценарии называют качественным инструментом преодоления традиционного мышления, в котором оцениваются факторы во времени. Сценарии также должны отображать имеющиеся проблемы, ресурсы и приоритеты, помимо планируемых изменений (Бакулина, Скворцов, 2012). В сценариях могут содержаться показатели, отражающие отраслевое развитие региона (Тарасова, 2016). В сценариях описывается комплекс управленческих действий при

составлении прогнозных моделей (Назаренко, Звягинцева, 2012). Для лесного хозяйства сценарное моделирование является важным инструментом в достижении баланса спроса и возможностей экосистемных услуг (Тебенькова и др., 2022). Цель настоящей статьи состоит в проведении обзора и систематизации российских и зарубежных работ по сценарному моделированию при проектировании и строительстве лесных дорог на региональном уровне. Задачи работы заключаются в: анализе текущего состояния вопросов лесного транспортного планирования и проектирования; описании истории, особенностей и преимуществ сценарного моделирования с примерами в лесном комплексе; изучении применения сценарного моделирования для решения задач лесного комплекса; обзоре современных методов, инструментов и данных для сценарного лесотранспортного моделирования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Шестьдесят статей обзора были проанализированы при помощи трёх инструментов. Использование первого – облака слов (<https://wordsccloud.pythonanywhere.com>) позволило графически показать содержание работ (названия статей и географические названия, которые в них упоминаются). Как

в русскоязычных, так и в англоязычных работах часто встречаются следующие слова и их варианты: дороги, сценарии, моделирование, лесное, региональное, развитие, сети. В меньшей степени, но также не в единственных случаях, в названиях статей присутствуют: ГИС, оценка, прогнозирование, анализ, условия,

Статьи обзора характеризуются географическим разнообразием стран, где строятся сценарии. Упомянуты такие страны, как Россия, Румыния, Швеция, Австралия, Польша. Среди регионов России преобладают северные, наиболее залесенные территории: Красноярский край, Республика Коми, Республика Саха



Рисунок 1. Облако слов названий русскоязычных статей обзора

транспорт и т.д. Облака слов (рис. 1-3) показали, что в подобранных для обзора статьях сценарии и лесотранспортное моделирование являются основной темой названий. Другая особенность анализа инструментом облака слов состоит в том, что российские и зарубежные работы схожи по названиям, объекту и предмету исследования, целям и задачам.

(Якутия), Архангельская область, Республика Карелия, Новосибирская область, а также Сибирский федеральный округ.

Вторым инструментом анализа статей обзора стала диаграмма связности (<https://www.connectedpapers.com>). В начале определяется исходный узел (ключевая статья обзора), от которого будет строиться диаграмма. Для россий-

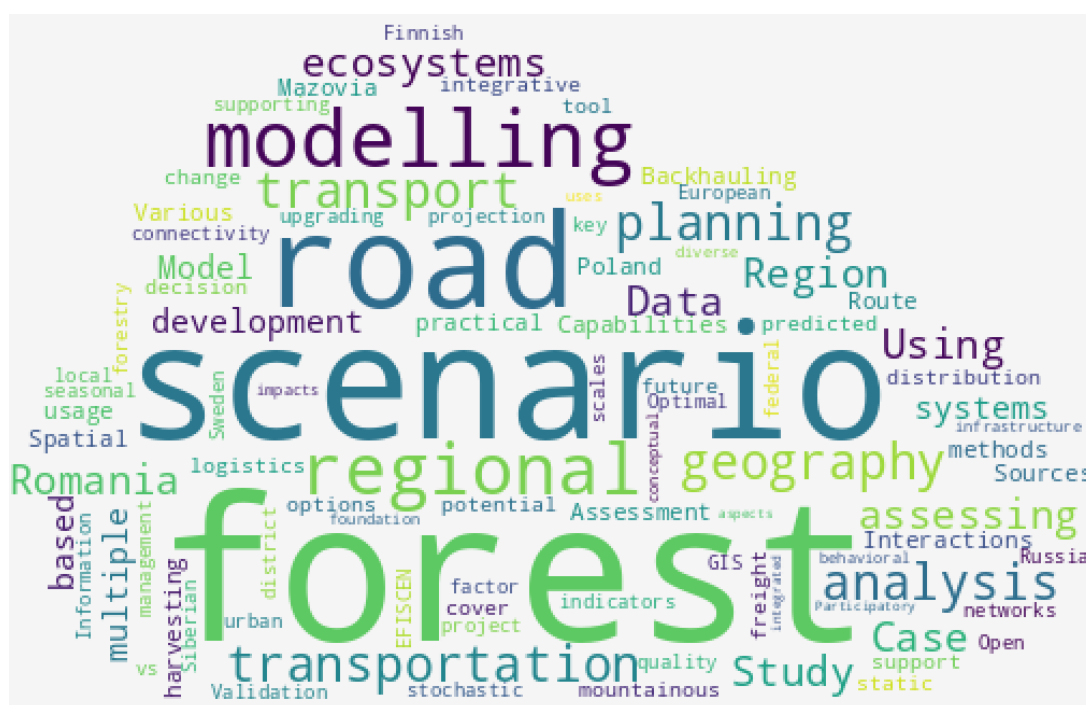


Рисунок 2. Облако слов названий англоязычных статей обзора



Рисунок 3. Облако слов географических названий, упоминаемых в статьях обзора

ских работ была выбрана статья «Теоретические аспекты сценарного моделирования развития регионов» (Гейман, 2009) для зарубежных – статья «Optimal

upgrading of forest road networks: Scenario analysis vs. stochastic modelling» (Olsson, 2007). Выбранные работы являются ключевыми в анализируемой теме, не-

однократно цитируются. Важной особенностью этого инструмента диаграмм связности является построение связей исключительно на основе внутренней базы статей. Каждый узел диаграммы

ся (наблюдается 5 чётких кластеров) и имеют более чёткие границы. В кластерах наблюдаются периоды, когда работы по сценарному моделированию были написаны. Так, наиболее крупные кла-

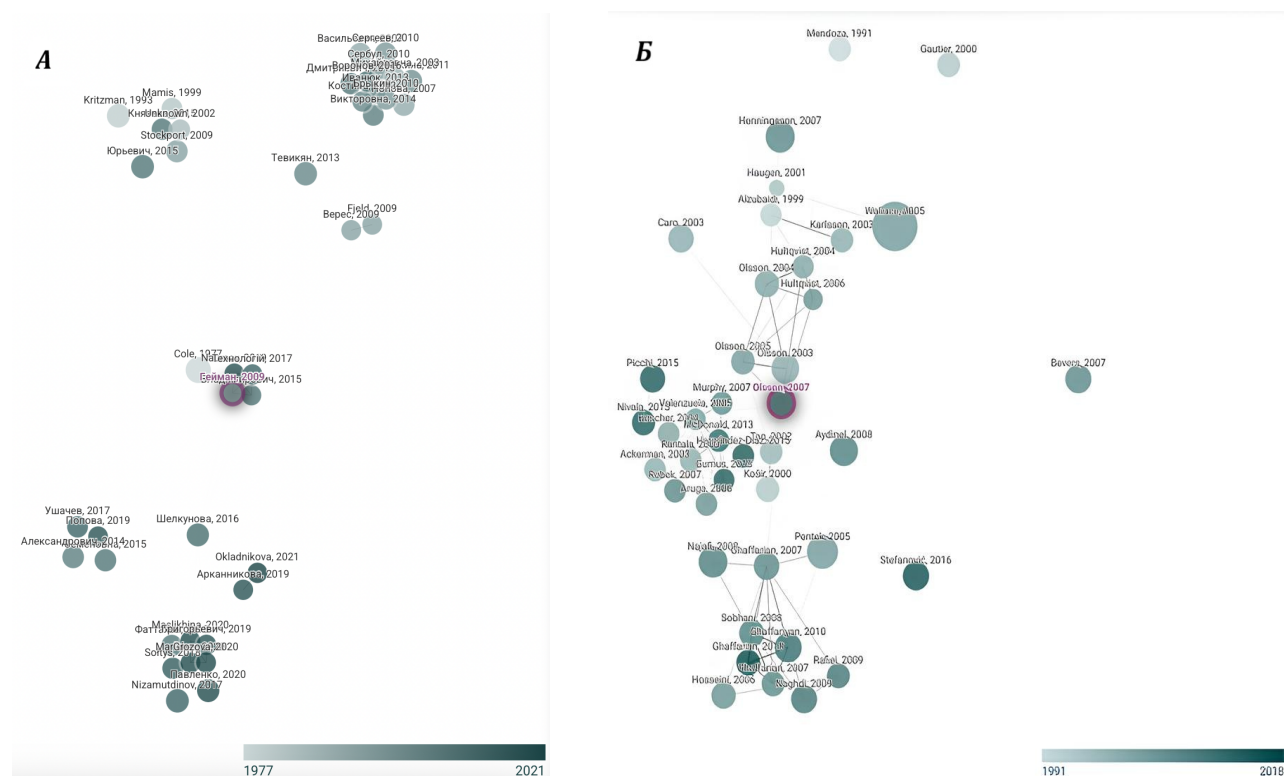


Рисунок 4. Анализ связности российских (А) и зарубежных (Б) работ по теме сценариев

представляет собой научную статью, связанную с исходной. Статьи упорядочены по степени их схожести и группируются в кластеры. Размер узла – это количество цитирований, его цвет – год публикации. Полученные диаграммы связности приведены на рисунке 4 для российских (А) и иностранных (Б) работ соответственно.

Российские работы охватывают период 1977-2021 гг., зарубежные – 1991-2018 гг. Англоязычные исследования больше связаны между собой, в то время как российские работы кластеризуют-

стеры российских исследований включают в себя работы периодов конца 2000-х – начала 2010-х и конца 2010-х гг. При этом зарубежные статьи были написаны ещё раньше (преимущественно в 2000-х гг.). Это может свидетельствовать о том, что массовое применение сценарного подхода в российском контексте произошло на 10-15 лет позднее, чем в мире в целом. В количестве цитирований зарубежные работы опережают российские, что возможно указывает на более широкую аудиторию читателей.

1	Русскоязычные публикации	Год выхода публикации	Количество цитирований
2	Бакулина М., Сворцова Я. Прогнозирование методом сценариев	2012	4
3	Богомолова Е. Ю., Давыдова Г. В. Влияние плотности лесных дорог на объём и качество лесопромышленных и лесохозяйственных работ	2016	35
4	Борисов А. И. Экономическая оценка и прогнозируемая модель развития сети автомобильных дорог Оймяконского района Якутии	2022	0
5	Ветрова Е. Н., Рохчин В. Е. Разработка сценарных условий долгосрочного развития региона: анализ опыта и методологические предложения	2014	5
6	Воловик Е. А., Черных Р. А. Моделирование схем транспортного освоения участков леса с применением ГИС	2021	1
7	Вырко Н. П., Тумашик И. И., Красковский С. В., Лой В. Н. Основные аспекты проектирования и строительства лесных автомобильных дорог в Республике Беларусь	2012	1
8	Гейман О. А. Теоретические аспекты сценарного моделирования развития регионов	2009	23
9	Громов И. А., Тюрин Н. А. Особенности создания цифровой модели местности для проектирования транспортной сети многоцелевого лесопользования	2017	3
10	Громская Л. Я., Артемьев В. В., Левушкин Д. М. Методика определения стоимости строительства лесных автомобильных дорог	2019	3
11	Добровольский Д. А., Подольская Е. С. Сценарии сезонного использования дорог в лесном хозяйстве Красноярского края	2024	0
12	Долматов С. Н., Макунина Я. С. Плотность сети лесных дорог как фактор устойчивого лесопользования на примере лесов Красноярского края	2023	2
13	Жиделева В. В., Левина И. В. Развитие сети лесных дорог в Республике Коми	2010	3
14	Ильин Б. А., Кувалдин Б. И. Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог	1982	77
15	Катаров В., Рожин Д. В., Сюнев В. С. Оптимальное проектирование сети лесных дорог: от методов к решениям	2023	0
16	Клебанова Т. С., Гурьянова Л. С., Трунова Т. Н., Смирнова А. Ю. Сценарное моделирование в управлении региональным развитием	2012	12
17	Кокуркин А. Д., Подольская Е. С. ГИС-инструменты с открытым кодом для распознавания дорог	2023	0
18	Коровин Г. Н., Голованов А. С., Зукерт Н. В., Корзухин М. Д., Нефедьев В. В. Лесные ресурсы: динамика, прогнозирование и оптимальное управление	2013	5
19	Коротин А. С., Попов Е. В. Оценка точности открытых цифровых моделей рельефа местности	2024	0
20	Кувалдин Б. И., Ионов Б. Д. Дороги в лесхозах	1967	9
21	Ладейщиков К. В., Чудинов С. А. Особенности эксплуатации лесовозных дорог в весенне-зимний период	2024	0
22	Лыщик П. А., Бавбель Е. И., Науменко А. И. Основные принципы развития сети лесных автомобильных дорог	2020	12

Рисунок 5. Русскоязычные статьи с указанием года выхода и цитируемости. Часть 1.

Более подробный анализ цитируемости работ производился с помощью сервиса Google Scholar (<https://scholar.google.com>), который показывает количество ссылок на статью. Кроме того, рассматривались также годы выхода статей, подсчитаны минимальные, максимальные, средние и медианные значения ввиду возможных выбросов. Русскоязычные и англоязычные работы рассматри-

вались отдельно. Результатами стала серия таблиц публикаций с указанием года и количества цитирований в других источниках (рис. 5-7). Это третий инструмент анализа предлагаемого обзора.

Вышедшая раньше остальных русскоязычная публикация датируется 1967 г., это учебный материал «Дороги в лесхозах» (Кувалдин, Ионов, 1967). Самыми актуальными работами являются три

23	Русскоязычные публикации	Год выхода публикации	Количество цитирований
24	Макеев В. Н., Сушков С. И., Ларионов В. Я., Левушкин Д. М. Коэффициент эффективности транспортно-грузовых процессов лесопромышленных производств	2017	0
25	Мохирев А. П., Зырянов М. А., Медведев С. О., Брагина Н. А. Анализ влияния климатических условий на начало эксплуатации летних лесовозных дорог	2020	4
26	Назаренко А. В., Звягинцева О. С. Сценарное прогнозирование развития социально-экономических систем	2012	75
27	Овешникова Л. В. Развитие региональной инфраструктуры на основе прогнозирования методами экспертных панелей, сценариев и дорожного картирования	2014	15
28	Пальмина-Линёва Е. С. Сезонные дороги: сближаемся с МСФО	2009	0
29	Пискунов М. В. Алгоритм построения оптимальной сети лесных дорог	2011	5
30	Подольская Е. С., Ершов Д. В., Ковганко К. А. Метод определения размера ячейки регулярной сети для инфраструктурного зонирования территории	2023	0
31	Подольская Е. С. Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса для распознавания изображения дорог в лесном хозяйстве	2022	2
32	Подольская Е. С. Методы и ГИС-инструменты машинного обучения с открытым кодом в лесном транспортном моделировании	2023	0
33	Подольская Е. С. Обзор опыта решения задач транспортного моделирования в лесном хозяйстве	2021	7
34	Подольская Е. С. Сезонность дорог в транспортном моделировании ГИС-проекта лесного хозяйства	2022	1
35	Порфирьев Б. Н., Скубачевская Н. Д., Милякин С. Р. Оценка эффективности затрат на модернизацию автомобильных дорог в России в целях их адаптации к климатическим изменениям и снижения риска ДТП	2023	2
36	Рафаилов М. К., Сураев А. Н. Организация использования лесов: лесные дороги	2015	6
37	Рослякова Н. А., Прокопьев Е. А., Рязанцев П. А. Опыт регрессионного моделирования влияния зимних условий на вывозку и формирование сценариев использования объектов сезонной транспортной инфраструктуры	2017	3
38	Салминен Э. О. Транспорт леса	2009	18
39	Степанова С. К., Астапов Д. О., Рябцев О. В., Сидоренкова Е. М., Сидоренков В. М. Оценка транспортной доступности лесных земель с использованием современных геоинформационных методов на примере Архангельской области	2017	7
40	Тарасова А. Ю. Сценарное планирование как инструмент формирования регионального стратегического развития	2016	2
41	Тебенькова Д. Н., Лукина Н. В., Катаев А. Д., Чумаченко С. И., Киселева В. В., Колычева А. А., Шанин В. Н., Гагарин Ю. Н., Кузнецова А. И. Разработка сценариев для имитационного моделирования экосистемных услуг лесов	2022	5
42	Тюкавкина-Плотникова С. Б. Роль транспорта в территориальной организации хозяйства: на примере Читинской области	2003	7
43	Тюрин Н. А., Громская Л. Я. Оптимизация структуры транспортной сети лесозаготовительного предприятия.	2009	9
44	Чумаченко С. И., Паленова М. М., Починков С. В., Кухар Кина Е. В. Имитационное моделирование динамики насаждений forqus-s - инструмент выбора стратегии и планирования лесного хозяйства	2007	17

Рисунок 6. Русскоязычные статьи с указанием года выхода и цитируемости. Часть 2

статьи, опубликованные в 2024 г.: «Сценарии сезонного использования дорог в лесном хозяйстве Красноярского края» (Добровольский, Подольская, 2024), «Оценка точности открытых цифровых моделей рельефа местности» (Коротин, Попов, 2024) и «Особенности эксплуатации лесовозных дорог в весенне-зимний

период» (Ладейщиков, Чудинов, 2024). Средний арифметический год выхода публикации – 2015, медианный – 2017. Это отличие объясняется наличием нескольких работ, вышедших ещё в XX в., одна из которых была упомянута выше.

Среди англоязычных работ данного обзора наиболее ранней является

статья «География, транспорт и региональное развитие» (ориг.: 'Geography, transportation, and regional development'), опубликованная в 1970 г. (Gauthier, 1970). Наиболее актуальной является работа «Оценка возможностей планирования лесных маршрутов с использованием различных источников пространственных данных: на примере региона Мазовия, Польша» (ориг.: 'Assessment of forest route planning capabilities using various spatial data sources: a case study of the Mazovia Region, Poland'), вышедшая в 2025 г. (Dawid, Pokonieczny, 2025). В силу

причин, характерных для русскоязычных работ, средний и медианный годы выхода публикаций также различаются на три года: 2009 г. и 2012 г., соответственно.

В отличие от годов публикации работ, дифференциация русскоязычных и англоязычных статей особенно заметна в количествах цитирований. Так, среднее и медианное число равняется 9 и 3.5, соответственно. При этом сразу 10 из 42 публикаций на момент написания данного обзора ещё не цитировались в других источниках. Наиболее цитируемой работой является учебное посо-

45	Англоязычные публикации	Год выхода публикации	Количество цитирований
46	Carlsson D., Ronnqvist M. Backhauling in forest transportation: models, methods, and practical usage	2007	132
47	Dawid W., Pokonieczny K. Assessment of forest route planning capabilities using various spatial data sources: a case study of the Mazovia Region, Poland	2025	1
48	Demir M. Interactions of forest road, forest harvesting and forest ecosystems	2012	5
49	Enache A., Ciobanu V. D., Kuhmaier M., Stampfer K. An integrative decision support tool for assessing forest road options in a mountainous region in Romania	2013	39
50	Gauthier H. L. Geography, transportation, and regional development	1970	169
51	Hesse M., Rodrigue J. P. The transport geography of logistics and freight distribution	2004	1462
52	Kucsicsa G., Popovici E. A., Balteanu D., Dumitraşcu M., Grigorescu I., Mitrica B. Assessing the potential future forest-cover change in Romania, predicted using a scenario-based modelling	2020	35
53	Lechner A. M., Harris R. M., Doerr V., Doerr E., Drielsma M., Lefroy E. C. From static connectivity modelling to scenario-based planning at local and regional scales	2015	45
54	Nabuurs G. J., Schelhaas M. J., Pussinen A. Validation of the European Forest Information Scenario Model (EFISCEN) and a projection of Finnish forests	2000	120
55	Oana P. L., Harutyun S., Brendan W., Sheila C. Scenarios and indicators supporting urban regional planning // Procedia-Social and Behavioral Sciences	2011	65
56	Olsson L. Optimal upgrading of forest road networks: Scenario analysis vs. stochastic modelling // Forest Policy and Economics	2007	22
57	Pentek T., Porsinsky T. Forest transportation systems as a key factor in quality management of forest ecosystems	2012	12
58	Podolskaia E. S., Akay A. E. Analysis of Open data on seasonal roads in a forestry transport GIS-project (Case study: Siberian federal district, Russia)	2023	2
59	Ring E., Wallgren M., Marald E., Westerfelt P., Djupstrom L., Davidsson A., Sonesson J. Forest roads in Sweden-infrastructure with multiple uses and diverse impacts	2024	2
60	Rodrigue J. P. The geography of transport systems	2020	9082
61	Schoemaker P. J. H. Multiple scenario development: Its conceptual and behavioral foundation	1993	1387
62	Walz A., Lardelli C., Behrendt H., Gret-Regamey A., Lundstrom C., Kytzia S., Bebi P. Participatory scenario analysis for integrated regional modelling	2007	236
63	Whittle J., Araujo J. Scenario modelling with aspects	2004	173

Рисунок 7. Англоязычные статьи с указанием года выхода и цитируемости

бие «Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог» – 77 цитирований (Ильин, Кувалдин, 1982). В англоязычных источниках публикацией с самым низким количеством цитирований является вышеупомянутая работа «Оценка возможностей планирования лесных маршрутов с использованием различных источников пространственных данных: на примере региона Мазовия, Польша» (ориг.: ‘Assessment of forest route planning capabilities using various spatial data sources: a case study of the Mazovia Region, Poland’) (Dawid, Pokonieczny, 2025). Из-за новизны работы всего в одном источнике на данный момент (май 2025 г.) упоминается эта статья. Максимальное значение – 9082 – принадлежит публикации «География транспортных систем» (ориг.: ‘The geography of transport systems’) (Rodrigue, 2020). Из-за такого большого числа цитирований у этой работы среднее и медианное значение существенно отличаются: они равны 727 и 55 цитированиям, соответственно. Такая значительная разница между русскоязычными и англоязычными работами объясняется, во-первых, ориентацией на мировую научную аудиторию, а не только на русскоязычную, и, во-вторых, более ранней публикацией статей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения опубликованных работ по сценарному моделированию в проектировании лесных дорог остановимся на рассмотрении возможностей использования сценариев и сценарного моделирования, существующих видов и рекомендаций по работе со сценариями, а также на применении сценарного моделирования в транспортных исследованиях. Далее последовательно обсудим особенности проектирования лесных дорог, а также методы, инструменты и данные для сценарного лесотранспортного моделирования.

1. Возможности использования сценариев и сценарного моделирования. Рассмотрим основные возможности использования сценариев с примерами работ:

1) сценарии способствуют адаптации к изменениям внешней среды и улучшают понимание эволюции предмета исследования, включая угрозы и возможности, что минимизирует последствия кризисных ситуаций и оптимизирует эффективность социально-экономических систем (Бакулина, Скворцов, 2012; Назаренко, Звягинцева, 2012; Клебано-ва и др., 2012; Ветрова, Рохчин, 2014);

2) сценарии улучшают результативность прогнозирования за счёт учета рисков и снижения неопределённости,

а также помогают в определении перспектив развития предпринимательства и предупреждении о возможных проблемах при неэффективных управленческих решениях (Гейман, 2009; Назаренко, Звягинцева, 2012; Овешникова, 2014);

3) сценарии являются качественным инструментом для разработки региональных стратегий, обеспечивая устойчивое развитие и позволяя выбирать пути совершенствования и целевые ориентиры для регионов (Гейман, 2009; Бакулина, Скворцов, 2012; Тарасова, 2016);

4) сценарии способствуют глубокому пониманию причин негативных событий и обеспечивают рациональное использование ресурсов, что важно для успешного управления развитием территорий (Гейман, 2009; Мусихин, 2023);

5) в отличие от традиционных методов прогнозирования, сценарии не создают затуманенных представлений о будущем и не затрудняют реакцию на изменения (Whittle, Araujo, 2004);

6) сценарное моделирование является быстрым и гибким инструментом, доступным для широкого круга пользователей, включая государственные органы, и эффективно применяется при планировании связности, землепользования и инвестиционной привлекательности территорий (Lechner et al., 2015; Мусихин, 2023). Однако, если необходимо рассмотреть)

прогнозные значения конкретных параметров, то применение сценарного моделирования может менять реальную картину, с течением времени сценарии могут устаревать и быть неактуальными, включая сценарии, разработанные государственными органами (Ветрова, Рохчин, 2014).

2. Виды и рекомендации по работе со сценариями. В связи с тем, что сценарии могут решать большое количество задач регионального развития в различных контекстах, разработка видов сценариев происходит в каждом случае по-разному, определяя набор вспомогательных факторов, присущих конкретной области исследования, что вытекает из сказанных выше слов о преимуществе сценарного подхода. Так, например, могут выделяться консервативный, умеренно-оптимистичный и инновационный сценарии (Ветрова, Рохчин, 2014). Или немного более классическое разделение на пессимистический, реалистический, оптимистический сценарии, которые могут формироваться как экспертным, так и формализованным путём (Назаренко, Звягинцева, 2012). Кроме того, существуют сценарии управления лесами, основанные на уровне охраны и защиты лесов, режим использования и воспроизводства ресурсов. В более узком варианте применяются только сценарии площадей

сплошных рубок (Коровин и др., 2013).

Временная разбивка обычно представляет собой формирование краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного сценариев. Разделяют также сценарии по их реализации: получение согласованного мнения, повторение независимых сценариев и применение матриц взаимодействия (Бакулина, Скворцова, 2012). В другой статье описано выделение пассивных (моделирование только поведенческих аспектов) и активных (моделирование с учётом поведенческих и управленческих параметров) сценариев (Гейман, 2009). В исследовании городского землепользования в Ирландии разработались такие сценарии, как: «бизнес как обычно», «компактное землепользование», «управляемое разрастание» и «рецессия» (Oana et al., 2011).

Известен ряд рекомендаций по работе со сценариями. Так, поощряется уточнять терминологический аппарат параметров, используемых в моделировании, для повышения ясности (Ветрова, Рохчин, 2014). Помимо этого, следует соблюдать последовательность действий при разработке сценариев (Овешникова, 2014). Разделяют анализ внешних и внутренних отраслевых факторов, формирующих сценарии: применяются методики анализа SWOT (сильные стороны – Strengths, слабые стороны – Weaknesses,

возможности – Opportunities и угрозы – Threats) и PEST (внешние факторы: P – политические; E – экономические; S – социокультурные; T – технологические), пример в работе (Тарасова, 2016). Для придания сценариям большей реалистичности, кроме объективных параметров, нужно принимать во внимание особенности региона (Бакулина, Скворцова, 2012).

Временной горизонт разработки сценариев равен горизонту стратегического планирования и другим возможностям прогнозирования (Гейман, 2009). Модель сценариев может отдельно учитывать участников, функциональные и нефункциональные требования (Whittle, Araujo, 2004). Рекомендуется сочетать количественные и качественные данные при построении прогнозов, например, партисипаторное планирование с участием местных жителей (Walz et al., 2007). В случае анализа социально-экономического потенциала региона можно применять районирование – разбивать территорию на ячейки, размер которых определяется на основе экспертной и объективной оценки некоторых факторов, которые уже зависят от конкретной постановки задач исследования (Подольская и др., 2023).

3. Применение сценарного моделирования в транспортных исследованиях. Сценарное моделирование используется в транспортных исследованиях

разных стран мира. К примеру, в Австралии сценарии использовались вместо устаревших статических моделей для анализа связности территорий в контексте различных состояний землепользования. Применялись мелкомасштабные модели, в которых использовалась теория графов, интегральный индекс связности и коэффициент кластеризации для поиска кратчайших путей. Территория разделена на участки, и расчёты проводились внутри них. Всего разработано 5 сценариев: статус-кво, активная урбанизация, упор на сельское хозяйство, возведение скоростной автомагистрали и восстановление зелёного коридора (Lechner et al., 2015).

В российском исследовании эффективности трат на модернизацию инфраструктуры автомобильных дорог разрабатывались сценарии адаптации к изменению климата и снижения аварийности на дорогах, поскольку изменение климата наносит ущерб инфраструктуре. Выделено три сценария: при отсутствии адаптации (базовый), оперативной адаптации и отложенной адаптации. Последние два отличаются масштабами применения технологий и управленческими решениями. В модели также учтены: температурные перепады, протяжённость дорог, динамика удельной протяжённости дорог. Авторы рекомендуют оперативную адаптацию из-за экономиче-

ской выгоды (Порфирьев и др., 2023).

Сценарное моделирование встречается в исследованиях по лесному хозяйству. В одной из таких работ разрабатываются методы «устойчивого и экологически грамотного землепользования». При помощи математического моделирования прогнозов развития экосистем в сценариях учитывались: динамика доступных ресурсов и запасов леса, породный и возрастной состав насаждений, биоразнообразие, денежные затраты и потенциальные доходы. Наибольший положительный экономический эффект показали сценарии с высокими первоначальными затратами (Чумаченко и др., 2007). Построение сценариев методом математического моделирования служит основой исследования воздействия изменений климата на вывозку древесины в Карелии. В данной статье разрабатывались оптимистичный и пессимистичный сценарии в зависимости от суммарных значений температур в холодное время года (Рослякова и др., 2017).

В работе (Nabuurs et al., 2000) прогнозируются лесные ресурсы Финляндии с 2000 до 2050 гг. Применялись три сценария: «бизнес как обычно» (продолжение вырубki на уровне 1990 г.), максимальное устойчивое производство (определение максимально интенсивного значения вырубki, при котором

средний объём древесины не уменьшается) и многофункциональный сценарий (основывается на природоохранных факторах и предполагает плавное увеличение вырубki хвойных пород, сохраняя уровень вырубki других пород на уровне 1990 г., но образование новых заповедных зон). Похожее, но более современное исследование проведено в Румынии, поводом которого стало изменение климата. Использовалась модель сценариев на период с 2007 по 2050 гг. Базовый сценарий основывался на линейном тренде изменений лесного покрова за предыдущие годы. Модель спрогнозировала увеличение площади лесов и снижение темпов годовых изменений лесного покрова (Kucsicsa et al., 2020). Ключевой работой по сценариям в лесотранспортном моделировании можно назвать статью (Olsson, 2007). Сценарии этой работы разрабатываются для оптимизации лесных дорог с целью создания запаса лесных ресурсов, круглогодичной транспортировки древесины и улучшения качества дорожной инфраструктуры. Авторы сравнивают двухэтапную стохастическую модель с анализом детерминистических сценариев. В модели отражены такие факторы, как: транспортные затраты, контракты на модернизацию дорог с частными землевладельцами, неопределённость вли-

ятельных погодных периодов (периоды дождей, весенние оттепели). Собственно, сами сценарии отличаются между собой количеством недель с непредсказуемыми погодными условиями. В результате стохастическая модель даёт лучшие показатели, чем детерминистский анализ. Сценарии имеют ГИС-реализацию. Примером служит исследование (Enache et al., 2013) с целью создания интеграционного ГИС-инструмента оценки вариантов лесных дорог в Румынии. Этот инструмент позволяет изучать сценарии лесного хозяйства с применением многокритериального анализа, учитывающего интересы всех стейкхолдеров на основе количественных и качественных параметров. Моделирование показало сокращение средней дистанции транспортировки древесины при условии улучшения качества дорог. Таким образом, сценарный метод прогнозирования обладает большим количеством преимуществ, в том числе гибкостью, минимизацией рисков, способностью эффективно работать со связностью территории и находить точки роста социально-экономических систем региона. Перечисленные аспекты особенно важны для больших территорий России, например, Красноярского края или Республики Саха. Возможные ограничения связаны не с особенностями работы

над сценариями, а непосредственно с факторами, которые в них будут включены. Составлена таблица (табл. 1) системати-

зации видов сценарного моделирования в научных исследованиях России (климат, комплексный прогноз), Австралии (про-

Таблица 1. Виды сценарного моделирования в применении к проектированию лесных дорог

Виды сценариев	Особенности	Примеры статей	Регионы/ страны	Роль в проектировании и строительстве лесных дорог
Сценарии климатической адаптации	Выделяются три сценария адаптации к изменению климата: базовый сценарий, при котором адаптация не осуществляется, и два активных сценария — оперативная адаптация и отложенная адаптация.	Порфирьев и др., 2023	Россия	Учет сезонности эксплуатации лесных дорог
Климатические сценарии	Сценарии моделируют запасы леса и вырубки на основе изменений климата (температура и осадки). На основе этого выделяют: пессимистичный, реалистичный и оптимистичный сценарии.	Рослякова и др., 2017; Kucsicsa et al., 2020	Республика Карелия, Россия; Румыния	Учет сезонности эксплуатации лесных дорог
Сценарии пространственного развития территории	Показаны пять сценариев пространственного развития: статус-кво, активная урбанизация, акцент на сельское хозяйство, строительство скоростной автомагистрали и восстановление зелёного коридора.	Lechner et al., 2015	Австралия	Комплексный прогноз развития сети лесных дорог
Сценарии прогноза изменений природных и экономических ресурсов	Сценарии описывают прогнозы вырубок на основе ряда параметров: транспортные затраты, контракты на модернизацию дорог, погодные условия, запасы леса, возрастной и породный состав деревьев и др.	Чумаченко и др., 2007; Olsson, 2007	Республика Коми, Россия; Швеция	Комплексный прогноз развития сети лесных дорог
Производственные сценарии	Сценарии выявляют ситуации с разными экономическими эффектами от деятельности предприятий лесного комплекса. Параметры: показатели вырубки леса, прибыль, интересы стейкхолдеров, изменение качества дорог, возможные государственные ограничения и управленческие решения	Nabuurs et al., 2000; Enache et al., 2013	Финляндия, Румыния	Строительство лесных дорог для предприятий лесопромышленного комплекса региона

странственное развитие территории), Швеции (комплексный прогноз), Румынии (климат, производство) и Финляндии (производство) с 2000 по 2023 гг.

4. Проектирование лесных дорог. Лесные экосистемы содержат разнообразные ресурсы: строительные материалы, полезные ископаемые, продукты питания, сырье для последующей переработки и т.д. Леса, помимо этого, играют важную экологическую роль, способствуя регулированию изменения климата и минимизации загрязнения. Концепция важности биологического разнообразия лесов признана по всему миру (Demir, 2012).

Предпосылкой проектирования новых лесных дорог служит обязательное наличие транспортных схем освоения лесных участков на весь срок аренды. Схемы должны включать перечень дорог круглогодичного и сезонного пользования, поскольку дороги обеспечивают рентабельность заготовки древесины на новых арендных участках путём наращивания объёмов использования лесов (Катаров и др., 2023). А увеличение площади арендованных участков повышает доходность региональных и федеральных бюджетов (Рафаилов, Сураев, 2015). При этом стоимость строительства непосредственно лесных дорог может варьироваться в зависимости от влажности, грунтов, технологии зем-

ляных работ и способа устройства дорожной одежды (Громская и др., 2019).

Как и автомобильные дороги общего пользования, лесные дороги характеризуются многообразием прямых и обратных связей, разнотипностью, динамичностью, равномерностью сооружения дорожных объектов, что делает задачу проектирования лесных дорог схожей с проектированием дорог общего пользования (Лыщик и др., 2020). Кроме того, лесные дороги могут являться и дорогами общего пользования между деревнями и сёлами (Тюрин, Громская, 2009). При этом, строительство этих двух видов дорог отличается из-за качества грунтов и заболоченности. Для лесных дорог также применяются преимущественно местные строительные материалы. Эксплуатация лесных транспортных артерий основана на частой необходимости развития транспортной сети (Вырко и др., 2012).

Проектировать лесные дороги необходимо по многим причинам. Так, транспортная доступность важна при борьбе с лесными пожарами, обеспечивая оперативность реагирования на их тушение (Подольская, 2021; Долматов, Макунина, 2023). Лесные дороги способствуют более эффективному использованию сырья и лесных ресурсов в целом (Demir, 2012; Ring et al., 2024; Жиделева, Левина, 2010). Кроме того, плотная сеть

дорог помогает в борьбе с вредителями и болезнями деревьев (Долматов, Макунина, 2023). Кроме того, трудоемкость лесного транспорта в рамках всего процесса лесозаготовок составляет 25-30%, а его доля в себестоимости лесной продукции превышает 40%. Лесовозные дороги играют значительную роль в развитии экономики региона, обеспечивая транспортные связи между населёнными пунктами. Наконец, лесные дороги необходимы для проведения лесовосстановительных работ (Ильин, Кувалдин, 1982).

В другом российском исследовании (Воловик, Черных, 2021) отмечается, что лесозаготовительные предприятия всё сильнее удаляются от населённых пунктов. Это приводит к увеличению расстояния вывозки и требует непрерывного строительства новых лесных дорог, что ведёт к сильному увеличению качества работы лесного производственного комплекса. Развитие дорожной сети круглогодичного действия обеспечивает рост лесозаготовок, которые должны обеспечивать спрос предприятий лесного комплекса на древесину, а также снижение транспортных расходов и себестоимости заготовки древесины. Лесные дороги вдобавок открывают возможности для размещения рекреационных объектов (Demir, 2012).

Важность транспорта в лесной

промышленности подчёркивают цифры – в Швеции 25% всех перевозок являются лесными (Carlsson, Ronnqvist, 2007). В этой стране особенно распространено пользование ресурсами леса – население активно собирает ягоды и грибы, отдыхает, охотится и т.д., то есть лесные дороги необходимы не только юридическим, но и физическим лицам (Ring et al., 2024). Несмотря на некоторое воздействие на экосистему при строительстве лесных дорог, их появление лишь уменьшает выбросы углекислого газа от транспортных средств: в лесах Румынии они уменьшились на 17% (Enache et al., 2013). К тому же лесное транспортное планирование необходимо и в военных целях, как например, в Польше (Dawid, Pokonieczny, 2025).

Лесные дороги имеют свои особенности проектирования. Оптимальные системы лесной транспортировки требуют тщательного планирования с учетом экономических, технических, экологических и социологических факторов. Главной проблемой, которая может возникнуть, является вред окружающей среде, что требует минимального вмешательства в экосистему. Например, следует восстанавливать повреждённые участки леса после завершения строительства, поддерживать буферные зоны возле водоёмов, тщательно следить за наклоном местности для минимизации

эрозии почв, поддерживать благоприятные условия для стабильного роста кустов и деревьев. Существует перечень рекомендаций по строительству лесных дорог, которые требуется соблюдать. Необходимо также понимать, что дорога, в том числе на этапе эксплуатации и обслуживания, а не только строительства, должна являться частью экосистемы леса, а не границей фрагментации ландшафта и барьером для диких животных. Распространение инвазивных видов животных тоже может служить негативным последствием. А потенциальная негативная общественная реакция на строительство в лесу накладывает репутационный отпечаток. В долгосрочной перспективе после открытия дорог старые транспортные артерии можно закрыть навсегда для восстановления экосистем. Наконец, следует опираться на существующие научные работы по экосистемам лесов и создавать новые исследования по этой теме (Pentek, Porsinsky, 2012; Demir, 2012).

Помимо экологического аспекта, должен приниматься во внимание экономический фактор. Само по себе строительство дорог в труднодоступной местности считается дорогим мероприятием, поскольку ресурсы вблизи населённых пунктов истощены, так как исторически земли осваивались около них. Соответственно, перед проектиро-

ванием дорог создаётся экономическая модель, учитывающая характеристики лесных ресурсов, существующее состояние инфраструктуры (плотность дорог, действующая средняя дистанция извлечения ресурсов и др.) (Жиделева, Левина, 2010; Pentek, Porsinsky, 2012). В учебнике «Транспорт леса» также отмечается, что ключевыми аспектами обоснования инноваций в лесной отрасли являются разработка и аргументация схем транспортного освоения лесов, которые необходимы для расчета и определения технико-экономических показателей лесозаготовительных предприятий и лесовозных дорог, а также для планирования их строительства, реконструкции и модернизации (Салминен, 2009).

Модель новых лесных дорог обязана учитывать также экологические и социальные факторы, но по итогу должна привести к оптимизации всего производственного процесса, несмотря на вложение в строительство и прочие негативные издержки (Demir, 2012; Enache et al., 2013; Громов, Тюрин, 2017).

Проектирование лесных автодорог рассматривается как способ снижения транспортных затрат, что позволяет повышать эффективность всей лесной промышленности, как указывалось выше (Воловик, Черных, 2021). Строительство лесных автомобиль-

ных дорог – это серьёзный задел на будущее, но в краткосрочном периоде от этого не будет экономических выгод (Demir, 2012). В целом, подобный шаг может вызвать конфликт интересов (коммерческие организации, лесничества, политики, общественность и т.д.), необходимо учитывать множество противоречивых целей, использовать комплексный подход и соблюдать баланс интересов (Enache et al., 2013; Ring et al., 2024).

В работе 1967 г. разработан показатель оценки лесной транспортной доступности – километр на 1 тыс. га. Так, для экономической эффективности лесного хозяйства протяжённость дорог должна быть равной 11 км на 1 тыс. га, а полный охват территорий достигается при 15 км на 1 тыс. га, при этом треть этих дорог должна иметь твёрдое покрытие для круглогодичного применения (Кувалдин, Ионов, 1967). По состоянию на 2009 г., плотность лесных дорог в России оценивалась значительно ниже, чем в западных странах (Тюрин, Громская, 2009). Другая метрика измерения успешности лесного транспорта и хозяйства в целом указывается в более современной работе. Существует коэффициент эффективности транспортно-грузового процесса, отражающий отношение идеальных затрат для удовлетворения транспортных потребностей к фактическим получив-

шимся затратам. Данный коэффициент может зависеть от типа лесного груза, расстояния транспортировки и условий погрузочно-разгрузочных мероприятий (Макеев и др., 2017). Тем не менее, в другом исследовании отмечается, что корреляция между плотностью сети и объёмом лесохозяйственных работ отсутствует, что ставит под сомнение целесообразность показателей плотности лесных дорог (Богомолова, Давыдова, 2016).

В изучении лесных дорог есть потребность анализа сезонности их использования. В тёплых регионах обычно бывают засушливые и дождливые периоды, в России, а также Канаде, Японии, скандинавских странах – зимний и летний. Такие типы дорог не имеют постоянного капитального покрытия, что делает их неустойчивыми к атмосферным воздействиям, особенно в летний период. Поэтому 80% заготовленной древесины вывозится в зимний период. Движение транспорта в таком случае происходит по льду, снегу и мёрзлому грунту. При этом строительство зимников может производиться и летом. Разработка логистических стратегий оптимизирует проектирование и строительство зимних дорог, что повышает общую эффективность перевозок при условии соблюдения баланса финансового планирования и количество месяцев в году, пригодных

для осуществления перевозок по зимникам (Пальмина-Линёва, 2009; Ладейщиков, Чудинов, 2024). Это особенно актуально в условиях изменения климата, когда количество морозных дней сокращается, что негативно сказывается на показателях объёма перевозок (Рослякова и др., 2017). Продолжительность и эффективность эксплуатации летников значительно зависит от количества влаги в грунтах в осенний период, а наиболее устойчивые погодные условия для перевозки по летникам наблюдаются с июля по сентябрь (Мохирев и др., 2020).

При проектировании новой инфраструктуры следует понимать, какой тип дороги больше всего подойдёт в модели – зимник, летник или дороги для круглогодичного использования, а также ежегодные сроки их функционирования, поскольку сезонность является ограничивающим фактором развития лесного хозяйства (Подольская, 2022). Так, в Республике Коми доля круглогодичных лесных дорог составляет не более 10% (Жиделева, Левина, 2010).

Тем не менее, далеко не все модели учитывают сезонность дорог. При этом для доступа к лесным пожарам и ресурсам учёт сезонности обязателен, особенно в северных районах, где сложные климатические условия и особенности сезонности ощущаются сильнее всего.

Однако на данный момент в открытых данных информация о сезонности дороги чаще всего отсутствует, особенно для Сибири, что требует изучения большого количества источников и сопоставления их, либо же пытаться брать данные из закрытых источников. В настоящее время данные о сезонности представлены в виде карт и текстовых описаний, а также иногда в атрибутах наборов данных OpenStreetMap (OSM) и Global Roads Inventory Project (GRIP). Хотя современные технические средства (машинное обучение и искусственный интеллект) обработки дистанционного зондирования Земли позволяют выявлять летние, зимние и круглогодичные дороги, что открывает горизонт для большого числа новых исследований, примеры для Сибирского федерального округа рассмотрены в ряде статей (Подольская, 2022; Podolskaia, Akay, 2023; Добровольский, Подольская, 2024).

В качестве природных объектов, способствующих появлению сезонных дорог, выступают ледники, болота, реки, озёра и т.д. В летний сезон они являются серьёзным препятствием, которое зачастую оказывается непреодолимым. А в зимнее время замёрзшая вода благоприятствует созданию однородной среды из снега и льда, которая способствует относительно комфортному передвижению транспортных средств.

Собственно, зимники в российском законодательстве определяются как временные конструкции с ледяным покрытием (Podolskaia, Aka, 2023), могут быть протяжёнными и встречаются чаще, чем летники. При проектировании сезонных дорог особенно важно учитывать реки с непостоянной береговой линией и перевалы, для этого используются ГИС-инструменты (Подольская, 2022).

Исследование по изучению сети лесных дорог в Республике Коми (Жиделева, Левина, 2010) является характерным примером описания сложностей учета сезонности. Несмотря на то, что статья уже не нова, описываемые в ней явления могут быть актуальны до сих пор, учитывая долгосрочность процесса возведения лесных транспортных артерий и эффекты от них. Работа описывает трудности лесных дорог Республики Коми и возможные пути их решения. К проблемам относят: большую зависимость от сезонности и невозможность ведения хозяйства круглый год (особенно не хватает летников), бесхозность существующих дорог (отсутствие эксплуатации на них или периодическое использование), плохое состояние дорожной инфраструктуры (никогда не проводилась диагностика), разное покрытие дорог (необходимо подстраивать технику под каждый отдельный объект), низкие

темпы строительства новых артерий при наличии спроса на новые связи (у существующих дорог лесной фонд истощён вырубками прошлых лет), нехватку финансирования строительства новых дорог (убыточность многих предприятий, использующих лесные транспортные артерии, что мешает капиталовложениям).

Лесным планом Республики Коми было предусмотрено расширение сети лесных дорог круглогодичного пользования, в первую очередь за счёт строительства новых мостов, в том числе магистральных и грузосборочных, а также путем реконструкции имеющихся объектов. В исследовании отмечается, что увеличение объёмов вырубки леса требует совместных усилий государственных органов и частных компаний. Отдельно отмечается необходимость инвестиционной поддержки, создание специальных дорожно-строительных компаний, возмещение затрат арендаторам, упрощение процедур использования месторождений полезных ископаемых, разработка нового арендного договора лесного фонда без аукциона и использование современных экономических технологий строительства дорог. Важно открывать дороги поэтапно, отдавая приоритет на основе арендной базы лесного хозяйства. Кроме того, вначале нужно сформировать каркас главных дорог.

Ещё один региональный пример – оценка транспортной доступности лесных территорий в Архангельской области (Степанова и др., 2017). Несмотря на наличие инфраструктуры, доступность остаётся на низком уровне из-за утраты узкоколейных железных дорог и износа автомобильных артерий. Кроме того, сеть характеризуется своей неравномерностью и сезонностью. Плотность лесных дорог региона напрямую зависит от показателей вывозки древесины, которые значительно ограничены. Помимо этого, использование лесных ресурсов только в целях рубки экономически нецелесообразно, кроме нескольких лесничеств.

Таким образом, лесные дороги важны в решении экономических, хозяйственных, производственных, рекреационных и других задач. Однако проектирование такой инфраструктуры – крайне сложный процесс, в котором надо учитывать экологический и социальный аспект, экономические цели в долгосрочном периоде. На текущий момент в России есть необходимость в создании новых лесных дорог, поскольку существующая инфраструктура не обновлялась долгое время, кроме того, многие ресурсы вдоль имеющихся дорог исчерпаны. Также в России есть проблема сезонности дорог – в первую очередь не хватает летников, что сдерживает развитие лесного хозяйства.

5. Методы, инструменты и данные для сценарного лесотранспортного моделирования. Несмотря на практическую ориентированность большинства изученных статей, исследования лесного хозяйства и лесных дорог могут быть основаны только на изучении имеющихся научных материалов, анализе статистических данных, отчётов и собственных данных авторов (Ring et al., 2024). Однако, такой подход значительно ограничивает возможные исследовательские пути.

При проектировании дорог в труднодоступных местах со сложным рельефом важным видом данных является цифровая модель рельефа (ЦМР). Она строится по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и позволяет учитывать микрорельеф, геоморфологические особенности территории при проектировании лесных дорог. Данные цифровых моделей категоризируются, известны выделенные типы рельефа, например, низменный и холмистый, горный, карстовый (Pentek, Porsinsky, 2012). Необходим тщательный выбор модели с учётом конкретных целей и задач работы (Коротин, Попов, 2024). Использование ГИС и ДЗЗ помогает проектировать современные лесные дороги эффективнее и быстрее методов, которые использовались ранее. Помимо этого, для лесного транспортного моделирования использу-

ются современные системы управления базами данных (СУБД), где формируются запросы на языке SQL (Пискунов, 2011).

При моделировании сети лесных дорог на основе открытых данных существующих датасетов будет недостаточно, поскольку открытые данные зачастую оказываются неточными и неактуальными. Съемка при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и последующая обработка полученных аэрофотоснимков при помощи нейросетей типа YOLO становятся значительным методическим и технологическим продвижением как в проектировании, так и в последующем строительстве лесных дорог. Результаты распознавания получают в векторном формате (Подольская, 2022). Известны ГИС-инструменты с открытым кодом для распознавания дорог (Кокуркин, Подольская, 2023), список которых будет расширяться.

Все большее количество задач лесного транспортного моделирования решается при помощи методов и технологий искусственного интеллекта (ИИ). Это связанные с лесными дорогами задачи классификации территории по инфраструктурной нагрузке и хозяйственному освоению, анализ состояния и аварийности дорожного покрытия, анализ обеспеченности логистическими объектами, выявление зависимостей между

локациями лесных пожаров и наличием инфраструктуры, определение ресурсного потенциала региона для развития лесопромышленного комплекса, обнаружение изменений сети дорог, учет сезонности движения и т.д. Применять ИИ можно непосредственно в ГИС, например, в Open Source QGIS в виде плагинов (Подольская, 2021; Подольская и др., 2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен обзор отечественных и зарубежных работ по сценарному моделированию при проектировании лесных дорог на региональном уровне. Необходимо отметить, что современных технологий пространственного анализа, машинного и глубокого обучения, а также накопленного опыта сценарного моделирования будет недостаточно при отсутствии качественных данных для работы с лесными дорогами и другими подобными инфраструктурными объектами, для которых важны точность, актуальность, а также учет сезонных изменений. В противном случае, некоторые маршруты (существующие и проектируемые) могут оказаться непреодолимыми, снизив эффективность моделирования (Кокуркин, Подольская, 2023; Dawid, Pokonieczny, 2025). Важным вопросом данных по лесным дорогам для российского лесного комплекса является их сезонность, определяющая возмож-

ности и региональные ограничения построения сезонных сценариев движения.

Несмотря на значительную проработку многих вопросов лесного комплекса и лесного транспортного моделирования как исследовательского поля и наличие статей в российской практике, можно отметить недостаток работ, связанных с проектированием дорог в отдалённых российских регионах. Есть нехватка актуальных исследований по лесотранспортным сценариям: большая часть рассмотренных работ были написаны в конце 2000-х и начале 2010-х, где технологии последних лет не применяются. Таким образом, для успешного прогнозирования сценарное моделирование проектирования и строительства лесных дорог должно основываться на базовых принципах работы с лесным транспортным планированием, учитывать возможности современного технологического прогресса, что, помимо актуальности, должно дать более точный результат, приближенный к реальной ситуации в российском регионе со сложными природно-климатическими условиями. Существующие риски и ограничения удастся нивелировать сценарным моделированием, учитывающим максимальное количество факторов, даст возможность выбора и, главное, разработки стратегии развития на основе набора вариантов.

Статья является частью курсового проектирования в магистратуре «Пространственные данные и прикладная геоаналитика» Факультета географии и геоинформационных технологий НИУ ВШЭ, выполненного в 2025 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (Регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакулина М., Скворцова Я. Прогнозирование методом сценариев // Экономика и социум. 2012. Т. 5. № 5. С. 51–55.
- Богомолова Е. Ю., Давыдова Г. В. Влияние плотности лесных дорог на объём и качество лесопромышленных и лесохозяйственных работ // Известия Байкальского государственного университета. 2016. Т. 26. № 2. С. 284–290.
- Борисов А. И. Экономическая оценка и прогнозируемая модель развития сети автомобильных дорог Оймяконского района Якутии // Управленческий учет. 2022. № 9–3. С. 245–249.
- Ветрова Е. Н., Рохчин В. Е. Разработка сценарных условий долгосрочного развития региона: анализ опыта и методологические предложения // Новая экономика России: наука и образование: тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург. 2014. С. 9–10.
- Воловик Е. А., Черных Р. А. Моделирование схем транспортного освоения участков леса с применением ГИС // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. 2021. С. 136–140.
- Вырко Н. П., Тумашик И. И., Красковский С. В., Лой В. Н. Основные аспекты проектирования и строительства лесных автомобильных дорог в Республике Беларусь // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. № 32. С. 13–17.
- Гейман О. А. Теоретические аспекты сценарного моделирования развития регионов // Экономика промышленности. 2009. Т. 48. № 5. С. 14–18.
- Громов И. А., Тюрин Н. А. Особенности создания цифровой модели местности для проектирования транспортной сети многоцелевого лесопользования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. № 219. С. 133–143.
- Громская Л. Я., Артемьев В. В., Левушкин Д. М. Методика определения стоимости строительства лесных автомобильных дорог // Лестной вестник. 2019. Т. 23. № 1. С. 77–83.
- Добровольский Д. А., Подольская Е. С. Сценарии сезонного использования дорог в лесном хозяйстве Красноярского края // Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проб-

лемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2024»), г. Москва, РТУ МИРЭА: сборник научных статей. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. С. 874–877.

Долматов С. Н., Макунина Я. С. Плотность сети лесных дорог как фактор устойчивого лесопользования на примере лесов Красноярского края // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2023. Т. 59. № 3. С. 87–97.

Жиделева В. В., Левина И. В. Развитие сети лесных дорог в Республике Коми // Региональная экономика: теория и практика. 2010. № 5. С. 11–15.

Ильин Б. А., Кувалдин Б. И. Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог. М.: Лесная промышленность. 1982. 385 с.

Катаров В., Рожин Д. В., Сюнев В. С. Оптимальное проектирование сети лесных дорог: от методов к решениям // Resources and Technology. 2023. Т. 20. № 3. С. 32–47.

Клебанова Т. С., Гурьянова Л. С., Трунова Т. Н., Смирнова А. Ю. Сценарное моделирование в управлении

региональным развитием // Бизнес Информ. 2012. № 10. С. 60–65.

Кокуркин А. Д., Подольская Е. С. ГИС-инструменты с открытым кодом для распознавания дорог // Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2023»). М.: МИРЭА – Российский технологический университет. Секция «Геоинформационные системы и технологии». 2023. С. 538–541.

Коровин Г. Н., Голованов А. С., Зукерт Н. В., Корзухин М. Д., Нефедьев В. В. Лесные ресурсы: динамика, прогнозирование и оптимальное управление / науч. ред. М. Д. Корзухин. 2013. 173 с.

Коротин А. С., Попов Е. В. Оценка точности открытых цифровых моделей рельефа местности // Омский научный вестник. 2024. Т. 191. № 3. С. 64–72.

Кувалдин Б. И., Ионов Б. Д. Дороги в лесхозах. М.: Лесная промышленность. 1967. 260 с.

Ладейщиков К. В., Чудинов С. А. Особенности эксплуатации лесовозных

- дорог в весенне-зимний период // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 4. С. 134–146.
- Лыщик П. А., Бавбель Е. И., Науменко А. И.* Основные принципы развития сети лесных автомобильных дорог // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. Т. 228. № 1. С. 125–130.
- Макеев В. Н., Сушков С. И., Ларионов В. Я., Левушкин Д. М.* Коэффициент эффективности транспортно-грузовых процессов лесопромышленных производств // Лесной вестник. 2017. Т. 21. № 4. С. 53–57.
- Мохирев А. П., Зырянов М. А., Медведев С. О., Брагина Н. А.* Анализ влияния климатических условий на начало эксплуатации летних лесовозных дорог // Успехи современного естествознания. 2020. № 9. С. 13–19.
- Назаренко А. В., Звягинцева О. С.* Сценарное прогнозирование развития социально-экономических систем // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 84. С. 575–587.
- Овешникова Л. В.* Развитие региональной инфраструктуры на основе прогнозирования методами экспертных панелей, сценариев и дорожного картирования // Среднерусский вестник общественных наук. 2014. Т. 35. № 5. С. 110–118.
- Пальмина-Линёва Е. С.* Сезонные дороги: сближаемся с МСФО // Финансовые и бухгалтерские консультации. 2009. № 1. С. 1–7.
- Пискунов М. В.* Алгоритм построения оптимальной сети лесных дорог // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2011. № 3. С. 58–63.
- Подольская Е. С.* Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса для распознавания изображения дорог в лесном хозяйстве // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 4. С. 1–21.
- Подольская Е. С.* Методы и ГИС-инструменты машинного обучения с открытым кодом в лесном транспортном моделировании // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6. № 3. С. 1–10.
- Подольская Е. С.* Обзор опыта решения задач транспортного моделирования в лесном хозяйстве // Вопросы

лесной науки. 2021. Т. 4. № 4. С. 96–128.

Подольская Е. С. Сезонность дорог в транспортном моделировании ГИС-проекта лесного хозяйства // *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сборник трудов Национальной научно-практической конференции / под ред. С. У. Увайсова – Москва: РТУ МИРЭА, 2022. С. 267–271.*

Подольская Е. С., Ершов Д. В., Ковганко К. А. Метод определения размера ячейки регулярной сети для инфраструктурного зонирования территории // *Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6. № 2. С. 1–13.*

Порфирьев Б. Н., Скубачевская Н. Д., Милякин С. Р. Оценка эффективности затрат на модернизацию автомобильных дорог в России в целях их адаптации к климатическим изменениям и снижения риска ДТП // *Проблемы прогнозирования. 2023. № 6. С. 103–118.*

Рафаилов М. К., Сураев А. Н. Организация использования лесов: лесные дороги // *Актуальные проблемы лесного комплекса. 2015. № 41. С. 68–71.*

Рослякова Н. А., Прокопьев Е. А., Рязанцев П. А. Опыт регрессионного

моделирования влияния зимних условий на вывозку и формирование сценариев использования объектов сезонной транспортной инфраструктуры // *Материалы IV Всероссийского симпозиума по региональной экономике. 2017. С. 262–267.*

Салминен Э. О. Транспорт леса. Учебник для вузов. В 2-х томах. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 367 с.

Степанова С. К., Астапов Д. О., Рябцев О. В., Сидоренкова Е. М., Сидоренков В. М. Оценка транспортной доступности лесных земель с использованием современных геоинформационных методов на примере Архангельской области // *Лесохозяйственная информация. 2017. № 2. С. 36–45.*

Тарасова А. Ю. Сценарное планирование как инструмент формирования регионального стратегического развития // *Алтайский вестник государственной и муниципальной службы. 2016. № 14. С. 91–95.*

Тебенькова Д. Н., Лукина Н. В., Катаев А. Д., Чумаченко С. И., Киселева В. В., Колычева А. А., Шанин В. Н., Гагарин Ю. Н., Кузнецова А. И. Разработка сценариев для имита-

- ционного моделирования экосистемных услуг лесов // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 2. С. 1–87. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-104
- Тюкавкина-Плотникова С. Б. Роль транспорта в территориальной организации хозяйства: на примере Читинской области: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук: 25.00.24. Ин-т географии СО РАН. Иркутск, 2003. 167 с.
- Тюрин Н. А., Громская Л. Я. Оптимизация структуры транспортной сети лесозаготовительного предприятия. 2009. № 186. С. 72–77.
- Чумаченко С. И., Паленова М. М., Починков С. В., Кухаркина Е. В. Имитационное моделирование динамики насаждений forrus-s - инструмент выбора стратегии и планирования лесного хозяйства // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2007. № 5. С. 143 – 152.
- Carlsson D., Ronnqvist M. Backhauling in forest transportation: models, methods, and practical usage // Canadian Journal of Forest Research. 2007. Vol. 37. No 12. P. 2612–2623.
- Dawid W., Pokonieczny K. Assessment of forest route planning capabilities using various spatial data sources: a case study of the Mazovia Region, Poland // Forests. 2025. Vol. 16. No 1. P. 1–19.
- Demir M. Interactions of forest road, forest harvesting and forest ecosystems // Forest Ecosystems-More than Just Trees, InTec. 2012. P. 415–431.
- Enache A., Ciobanu V. D., Kuhmaier M., Stampfer K. An integrative decision support tool for assessing forest road options in a mountainous region in Romania // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. 2013. Vol. 34. No. 1. P. 43–60.
- Gauthier H. L. Geography, transportation, and regional development // Economic Geography. 1970. Vol. 46. No. 4. P. 612–619.
- Hesse M., Rodrigue J. P. The transport geography of logistics and freight distribution // Journal of transport geography. 2004. Vol. 12. No. 3. P. 171–184.
- Kucsicsa G., Popovici E. A., Balteanu D., Dumitraşcu M., Grigorescu I., Mitrica B. Assessing the potential future forest-cover change in Romania, predicted using a scenario-based modelling // Environmental Modeling & Assessment. 2020. Vol. 25. P. 471–491.
- Lechner A. M., Harris R. M., Doerr V., Doerr E., Drielsma M., Lefroy E. C. From static

- connectivity modelling to scenario-based planning at local and regional scales // *Journal for Nature Conservation*. 2015. Vol. 28. P. 78–88.
- Nabuurs G. J., Schelhaas M. J., Pussinen A.* Validation of the European Forest Information Scenario Model (EFISCEN) and a projection of Finnish forests // *Silva Fennica*. 2000. Vol. 34. No. 2. P. 167–179.
- Oana P. L., Harutyun S., Brendan W., Sheila C.* Scenarios and indicators supporting urban regional planning // *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2011. Vol. 21. P. 243–252.
- Olsson L.* Optimal upgrading of forest road networks: Scenario analysis vs. stochastic modelling // *Forest Policy and Economics*. 2007. Vol. 9. No. 8. P. 1071–1078.
- Pentek T., Porsinsky T.* Forest transportation systems as a key factor in quality management of forest ecosystems // *Forest Ecosystems–More than Just Trees* / J. A. Blanco, Y. H. Lo (eds.), In Tech. 2012. P. 433–464.
- Podolskaia E. S., Akay A. E.* Analysis of Open data on seasonal roads in a forestry transport GIS-project (Case study: Siberian federal district, Russia) // *Proceedings of COFE-FETEC 2023 – Forest Operations: A Tool for Forest Management* Flagstaff, Arizona, USA – May 23 – 25. 2023. P. 12–21.
- Ring E., Wallgren M., Marald E., Westerfelt P., Djupstrom L., Davidsson A., Sonesson J.* Forest roads in Sweden-infrastructure with multiple uses and diverse impacts // *Silva Fennica*. 2024. Vol. 58. No. 4. P. 1–32.
- Rodrigue J. P.* The geography of transport systems. 6th edition. Routledge. 2020. 402 p.
- Schoemaker P. J. H.* Multiple scenario development: Its conceptual and behavioral foundation // *Strategic management journal*. 1993. Vol. 14. No 3. P. 193–213.
- Walz A., Lardelli C., Behrendt H., Gret-Regamey A., Lundstrom C., Kytzia S., Bebi P.* Participatory scenario analysis for integrated regional modelling // *Landscape and urban Planning*. 2007. Vol. 81. No. 1-2. P. 114–131.
- Whittle J., Araujo J.* Scenario modelling with aspects // *IEE Proceedings-Software*. 2004. Vol. 151. No. 4. P. 157–171.

REFERENCES

- Bakulina M., Skvorcova Ya., Prognozirovanie metodom scenariyev (Scenario-based forecasting), *Ekonomika i socium*, 2012, Vol 5. No 5, pp. 51–55.

- Bogomolova E. Yu., Davydova G. V., Vliyanie plotnosti lesnyh dorog na ob'em i kachestvo lesopromyshlennyh i lesohozyajstvennyh rabot (Impact of forest road density on the volume and quality of forestry and forestry operations), *Izvestiya Bajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, Vol. 26, No 2, pp. 284–290.
- Carlsson D., Ronnqvist M., Backhauling in forest transportation: models, methods, and practical usage, *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, Vol. 37, No 12, pp. 2612–2623.
- Chumachenko S. I., Palenova M. M., Pochinkov S. V., Kuhar Kina E. V., Imitacionnoe modelirovanie dinamiki nasazhdenij forrus-s - instrument vybora strategii i planirovaniya lesnogo hozyajstva (Simulation modelling plantation dynamics forrus-s - a tool for forest strategy selection and planning), *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik*, 2007, No 5, pp. 143–152.
- Dawid W., Pokonieczny K., Assessment of forest route planning capabilities using various spatial data sources: a case study of the Mazovia Region, Poland, *Forests*, 2025, Vol. 16, No 1, pp. 1–19.
- Demir M., Interactions of forest road, forest harvesting and forest ecosystems, *Forest Ecosystems-More than Just Trees, InTec*, 2012, pp. 415–431.
- Dobrovolskiy D. A., Podolskaia E. S., Scenarios for seasonal use of roads in the forestry of Krasnoyarsk Krai, *Proceedings of the VIII International scientific and practical conference «Actual problems and prospects for the development of radio engineering and infocommunication systems» («Radioinfocom-2024»)*, Moscow, MIREA - Russian Technological University, 2024. pp. 874–877.
- Dolmatov S. N., Makunina Ya. S., Plotnost' seti lesnyh dorog kak faktor ustojchivogo lesopol'zovaniya na primere lesov Krasnoyarskogo kraja (Forest road network density as a factor of sustainable forest management on the example of Krasnoyarsk Krai forests), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2023, Vol. 59. No 3, pp. 87–97.
- Enache A., Ciobanu V. D., Kuhmaier M., Stampfer K., An integrative decision support tool for assessing forest road options in a mountainous region in Romania, *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and*

- Application of Forestry Engineering*, 2013, Vol. 34, No 1, pp. 43–60.
- Gauthier H. L., Geography, transportation, and regional development, *Economic Geography*, 1970, Vol. 46, No 4, pp. 612–619.
- Gejman O. A., Teoreticheskie aspekty sценарного моделиrovaniya razvitiya regionov (Theoretical aspects of scenario modelling of regional development), *Ekonomika promyshlennosti*, 2009, Vol. 48, No 5, pp. 14–18.
- Gimadi I. E., Dobrodej V. V., Matushkina N. A., Modelirovanie razvitiya transportnogo kompleksa regiona (Modeling the development of the regional transport complex), *Ekonomika regiona*, 2005, No 3, pp. 50–63.
- Gromov I. A., Tyurin N. A., Osobennosti sozdaniya cifrovoj modeli mestnosti dlya proektirovaniya transportnoj seti mnogocелеvogo lesopol'zovaniya (Features of creating a digital terrain model for designing a transport network for multipurpose forest management), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2017, No 219, pp. 133–143.
- Gromskaya L. Ya., Artem'ev V. V., Levushkin D. M., Metodika opredeleniya stoimosti stroitel'stva lesnyh avtomobil'nyh dorog (Methodology for determining the cost of construction of forest roads), *Lesnoj vestnik*, 2019, Vol. 23, No 1, pp. 77–83.
- Hesse M., Rodrigue J. P., The transport geography of logistics and freight distribution, *Journal of Transport Geography*, 2004, Vol. 12, No 3, pp. 171–184.
- <https://scholar.google.com> (2025, 15 April)
- <https://wordsccloud.pythonanywhere.com> (2025, 15 April)
- <https://www.connectedpapers.com> (2025, 15 April)
- Il'in B. A., Kuvaldin B. I., *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya lesovoznyh dorog* (Design, construction and operation of forest roads), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1982, 385 p.
- Katarov V., Rozhin D. V., Syunев V. S., Optimal'noe proektirovanie seti lesnyh dorog: ot metodov k resheniyam (Optimal forest road network design: from methods to solutions), *Resources and Technology*, 2023, Vol. 20, No 3, pp. 32–47.
- Klebanova T. S., Gur'yanova L. S., Trunova T. N., Smirnova A. Yu., Scenarnoe modelirovanie v upravlenii regional'nym razvitiem (Scenario modelling in regional development management), *Biznes Inform*, 2012, No 10, pp. 60–65.

- Kokurkin A. D., Podol'skaya E. S., GIS-instrumenty s otkryтым kodom dlya raspoznavaniya dorog (Open Source GIS tools for road recognition), *VII International Scientific and Practical Conference «Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Information Communication Systems» «RADIOINFOCOM — 2023»* Moscow: MIREA – Rossijskij tekhnologicheskij universitet. Sekciya «Geoinformacionnye sistemy i tekhnologii», 2023, pp. 538–541.
- Korotin A. S., Popov E. V., Ocenka tochnosti otkrytyh cifrovyyh modelej rel'efa mestnosti (Evaluation of the accuracy of open digital terrain elevation models), *Omskij nauchnyj vestnik*, 2024, Vol. 191, No 3, pp. 64–72.
- Korovin G. N., Golovanov A. S., Zukert N. V., Korzuhin M. D., Nefed'ev V. V., *Lesnye resursy: dinamika, prognozirovaniye i optimal'noye upravleniye* (Forest resources: dynamics, forecasting and optimal management), M. D. Korzuhin, 2013. 173 p.
- Kucsicsa G., Popovici E. A., Balteanu D., Dumitraşcu M., Grigorescu I., Mitrica B., Assessing the potential future forest-cover change in Romania, predicted using a scenario-based modelling, *Environmental Modeling & Assessment*, 2020, Vol. 25, pp. 471–491.
- Kuvaldin B. I., Ionov B. D., *Dorogi v leskhozah* (Roads in forestry farms), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1967, 260 p.
- Ladejshchikov K. V., Chudinov S. A., Osobennosti ekspluatacii lesovoznyh dorog v vesenne-zimnij period (Peculiarities of forest roads operation in spring-winter period), *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*, 2024, No 4, pp. 134–146.
- Lechner A. M., Harris R. M., Doerr V., Doerr E., Drielsma M., Lefroy E. C., From static connectivity modelling to scenario-based planning at local and regional scales, *Journal for Nature Conservation*, 2015, Vol. 28, pp. 78–88.
- Lyshchik P. A., Bavbel' E. I., Naumenko A. I., Osnovnye principy razvitiya seti lesnyh avtomobil'nyh dorog (Basic principles of forest road network development), *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoye hozyajstvo, prirodnopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemyh resursov*, 2020. Vol. 228, No 1, pp. 125–130.
- Makeev V. N., Sushkov S. I., Larionov V. Ya., Levushkin D. M., Koefficient effektivnosti transportno-gruzovyh processov lesopromyshlennyh proiz-

- vodstv (Coefficient of efficiency of transport and cargo processes of timber processing industries), *Lesnoj vestnik*, 2017, Vol. 21, No 4, pp. 53–57.
- Mohirev A. P., Zyryanov M. A., Medvedev S. O., Bragina N. A., Analiz vliyaniya klimaticheskikh uslovij na nachalo ekspluatacii letnih lesovoznyh dorog (Analysis of the influence of climatic conditions on the beginning of summer forest roads operation), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2020, No 9, pp. 13–19.
- Musihin I. A., Planirovanie regional'nogo ekonomicheskogo razvitiya na osnove geoprostranstvennoj technologii scenarnogo analiza territorii (Planning of regional economic development based on geospatial technology of scenario analysis of the territory), *XII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Aktual'nye voprosy geodezii i geoinformacionnyh sistem»* (XII International scientific and practical conference «Current issues of geodesy and geoinformation systems»), Kazan', 2023, Vol. 8, p. 26.
- Nabuurs G. J., Schelhaas M. J., Pussinen A., Validation of the European Forest Information Scenario Model (EFISCEN) and a projection of Finnish forests, *Silva Fennica*, 2000, Vol. 34, No 2, pp. 167–179.
- Nazarenko A. V., Zvyaginceva O. S., Scenar-noe prognozirovanie razvitiya social'no-ekonomicheskikh sistem (Scenario forecasting of socio-economic systems development), *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, No 84, pp. 575–587.
- Oana P. L., Harutyun S., Brendan W., Sheila C., Scenarios and indicators supporting urban regional planning, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2011, Vol. 21, pp. 243–252.
- Olsson L., Optimal upgrading of forest road networks: Scenario analysis vs. stochastic modelling, *Forest Policy and Economics*, 2007, Vol. 9, No 8, pp. 1071–1078.
- Oveshnikova L. V., Razvitie regional'noj infrastruktury na osnove prognozirovaniya metodami ekspertnyh panelej, scenarijev i dorozhnogo kartirovaniya (Regional infrastructure development based on forecasting by expert panels, scenarios and road mapping method), *Srednerusskij vestnik obshchestvennyh nauk*, 2014, Vol. 35, No 5, pp. 110–118.

- Pal'mina-Linyova E. S., Sezonnye dorogi: sblizhaemysya s MSFO (Seasonal roads: getting closer to IFRS), *Finansovye i buhgalterskie konsul'tacii*, 2009, No 1, pp. 1–7.
- Pentek T., Porsinsky T., Forest transportation systems as a key factor in quality management of forest ecosystems, *Forest Ecosystems—More than Just Trees*, J. A. Blanco, Y. H. Lo (eds.), In Tech, 2012, pp. 433–464.
- Piskunov M. V., Algoritm postroeniya optimal'noj seti lesnyh dorog (Algorithm for building an optimal forest road network), *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*, 2011, No 3, pp. 58–63.
- Podolskaia E. S., Ershov D. V., Kovgan-ko K. A., Metod opredeleniya razmera yachejki regul'yarnoj seti dlya infrastrukturnogo zonirovaniya territorii (Method for determining the size of a regular network cell for infrastructure zoning of an area), *Voprosy lesnoj nauki*, 2023, Vol. 6, No 2, pp. 1–13.
- Podolskaia E. S., Ispol'zovanie dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa dlya raspoznavaniya izobrazheniya dorog v lesnom hozyajstve (Using Earth remote sensing data from space for road image recognition in forestry), *Voprosy lesnoj nauki*, 2022, Vol. 5, No 4, pp. 1–21.
- Podolskaia E. S., Metody i GIS-instrumenty mashinnogo obucheniya s otkrytym kodom v lesnom transportnom modelirovanii (Open Source machine learning methods and GIS tools in forest transport modelling), *Voprosy lesnoj nauki*, 2023, Vol. 6, No 3, pp. 1–10.
- Podolskaia E. S., Obzor opyta resheniya zadach transportnogo modelirovaniya v lesnom hozyajstve (Review of experience in solving transport modelling problems in forestry sector), *Voprosy lesnoj nauki*, 2021, Vol. 4, No 4, pp. 96–128.
- Podolskaia E. S., Sezonnost' dorog v transportnom modelirovanii GIS-proekta lesnogo hozyajstva (Road seasonality in transport modelling of forestry GIS project), *Fundamental'nye, poiskovyie, prikladnye issledovaniya i innovacionnye proekty: sbornik trudov Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii* (Fundamental, search, applied research and innovative projects: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference), Moscow: RTU MIREA, 2022, pp. 267–271.

- Podolskaia E. S., Akay A. E., Analysis of Open data on seasonal roads in a forestry transport GIS-project (Case study: Siberian federal district, Russia), *Proceedings of COFE-FETEC*, 2023, pp. 12–21.
- Porfir'ev B. N., Skubachevskaya N. D., Milyakin S. R., Ocenka effektivnosti zatrat na modernizaciyu avtomobil'nyh dorog v Rossii v celyah ih adaptacii k klimaticheskim izmeneniyam i snizheniya riska DTP (Assessing the cost-effectiveness of road modernisation in Russia to adapt to climate change and reduce the risk of road accidents), *Problemy prognozirovaniya*, 2023, No 6, pp. 103–118.
- Rafailov M. K., Suraev A. N., Organizaciya ispol'zovaniya lesov: lesnye dorogi (Organisation of forest use: forest roads), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2015, No 41, pp. 68–71.
- Ring E., Wallgren M., Marald E., Westerfelt P., Djupstrom L., Davidsson A., Sonesson J., Forest roads in Sweden-infrastructure with multiple uses and diverse impacts, *Silva Fennica*, 2024, Vol. 58, No 4, pp. 1–32.
- Rodrigue J. P., *The geography of transport systems*, New York, Routledge, 6 th edition, 2020, 402 p.
- Roslyakova N. A., Prokop'ev E. A., Ryazancev P. A., Opyt regressionnogo modelirovaniya vliyaniya zimnih uslovij na vyvozku i formirovanie scenariy ispol'zovaniya ob'ektov sezonnoj transportnoj infrastruktury (Experience in regression modelling of the impact of winter conditions on haulage and formation of scenarios for the use of seasonal transport infrastructure facilities), *Materialy IV Vserossijskogo simpoziuma po regional'noj ekonomike* (Proceedings of the IV All-Russian Symposium on Regional Economics), 2017, pp. 262–267.
- Salminen E. O., *Transport lesa. Uchebnik dlya vuzov. V 2-h tomah* (Forest transport. Textbook for universities. In 2 volumes), Moscow: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2009, Vol. 1, 367 p.
- Schoemaker P. J. H., Multiple scenario development: Its conceptual and behavioral foundation, *Strategic Management Journal*, 1993, Vol. 14, No 3, pp. 193–213.
- Stepanova S. K., Astapov D. O., Ryabcev O. V., Sidorenkova E. M., Sidorenkov V. M., Ocenka transportnoj dostupnosti lesnyh zemel' s ispol'zovaniem sovremennyh geoinformacionnyh metodov na primere Arhangel'skoj oblasti (Assessment of transport accessi-

- bility of forest lands using modern geoinformation methods on the example of the Arkhangelsk region), *Lesohozyajstvennaya informaciya*, 2017, No 2, pp. 36–45.
- Tarasova A. Yu., Scenarnoe planirovanie kak instrument formirovaniya regional'nogo strategicheskogo razvitiya (Scenario planning as a tool for shaping regional strategic development), *Altajskij vestnik gosudarstvennoj i municipal'noj sluzhby*, 2016, No 14, pp. 91–95.
- Tebenkova D. N., Lukina N. V., Kataev A. D., Chumachenko S. I., Kiseleva V. V., Kolusheva A. A., Shanin V. N., Gagarin Yu. N., Kuznetsova A. I., Razrabotka scenarijev dlja imitacionnogo modelirovaniya jekosistemnyh uslug lesov (Development of scenarios for imitation modeling of forest ecosystems services), *Voprosu lesnoj nauki*, 2022, Vol. 5, No 2, pp. 1–87, DOI: 10.31509/2658-607x-202252-104
- Tyurin N. A., Gromskaya L. Ya., Optimizaciya struktury transportnoj seti les-ozagotovitel'nogo predpriyatiya (Optimisation of the structure of the transport network of a logging enterprise), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2009, No 186, pp. 72–77.
- Vetrova E. N., Rohchin V. E., Razrabotka scenarnyh uslovij dolgosrochnogo razvitiya regiona: analiz opyta i metodologicheskie predlozheniya (Development of scenario conditions for long-term regional development: analysis of experience and methodological proposals), *Novaya ekonomika Rossii: nauka i obrazovanie: tezisy dokladov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* (The New Russian Economy: Science and Education: Abstracts of Reports of the All-Russian Scientific and Practical Conference), Sankt-Peterburg, 2014, pp. 9–10.
- Volovik E. A., Chernyh R. A., Modelirovanie skhem transportnogo osvoeniya uchastkov lesa s primeneniem GIS (Modelling of schemes of transport development of forest areas with GIS application), *Molodye uchenye v reshenii aktual'nyh problem nauki*, 2021, pp. 136–140.
- Vyrko N. P., Tumashik I. I., Kraskovskij S. V., Loj V. N., Osnovnye aspekty proektirovaniya i stroitel'stva lesnyh avtomobil'nyh dorog v Respublike Belarus' (Main aspects of design and construction of forest roads in the Republic of Belarus), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2012, No 32, pp. 13–17.

- Walz A., Lardelli C., Behrendt H., Gret-Regamey A., Lundstrom C., Kytzia S., Bebi P., Participatory scenario analysis for integrated regional modelling, *Landscape and Urban Planning*, 2007, Vol. 81, No 1-2, pp. 114–131.
- Whittle J., Araujo J., Scenario modelling with aspects, *IEE Proceedings-Software*, 2004, Vol. 151, No 4, pp. 157–171.
- Zhideleva V. V., Levina I. V., Razvitie seti lesnyh dorog v Respublike Komi (Development of forest road network in the Komi Republic), *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika*, 2010, No 5, pp. 11–15.

AN OVERVIEW OF PUBLICATIONS ON SCENARIO MODELING IN THE DESIGN OF FOREST ROADS

E. S. Podolskaia^{1,2}, Yu. V. Shatalin²

¹*Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow 117997, Russian Federation*

²*National Research University Higher School of Economics (HSE University)
20 Myasnitskaya st., Moscow, 101000, Russia*

E-mail: podols_kate@mail.ru; y-shatalin@mail.ru

Received: 30.04.2025

Revised: 26.05.2025

Accepted: 02.06.2025

Paper aims to review and systematize scenario modeling work in the design and construction of forest roads at the regional level. The research objectives are: to analyze the current state of forest transport planning and design issues; to describe the history, features and advantages of scenario modeling with examples in the forest complex; to study the use of scenario modeling for solving forest complex problems; and to review the modern tools, methods and data for scenario forestry transport modeling. A table of scenario modeling types has been compiled as applied to the design and construction of forest roads based on the papers from Russia, Australia, Sweden, Romania and Finland. The graphic part of review is presented by a number of tools: a cloud of words for the papers names and the geographical names mentioned, as well as the construction of a connectivity diagram for the names of Russian and foreign papers. There is more connectivity among the English-language papers (1991-2018) than among Russian examples (1977-2021). Citation analysis of Russian and foreign papers showed the dominance of the latter due to the fact that they are written in English and, accordingly, are aimed at researchers around the world, as well as due to the earlier research dates. In conclusion we state that there is an insufficient amount of work on the forestry transport scenarios (researches of late 2000s and early 2010) and the need to use methods and technologies that have become available for modeling and building scenarios in recent years.

Keywords: *scenarios, scenario modeling, regional level, forest complex, forest roads, GIS*