

# Оптимизация логистических цепочек сбора и транспортировки низкосортной древесины и отходов лесопиления для биоэнергетических установок в архангельской области: моделирование на основе смешанной целочисленной линейной оптимизации

## Optimization of Collection and Transportation Logistics Chains for Low-Grade Wood and Sawmill Residues for Bioenergy Plants in the Arkhangelsk Region: Modeling Based on Mixed Integer Linear Optimization

DOI: 10.12737/2587-9111-2026-14-2-39-44

Получено: 22 января 2026 г. / Одобрено: 14 февраля 2026 г. / Опубликовано: 25 апреля 2026 г.

**Спиричев В.Д.**Аспирант, место учебы  
e-mail: spirichev.v@edu.narfu.ru**Пластинин А.В.**Д-р экон. наук, место работы  
e-mail: a.plastinin@narfu.ru**Spirichev V.D.**Postgraduate Student, место учебы  
e-mail: sperichev.v@edu.narfu.ru**Plastinin A.V.**Doctor of Economic Sciences, место работы  
e-mail: a.plastinin@narfu.ru**Аннотация**

В статье рассматривается проблема высоких логистических затрат при использовании лесных отходов для биоэнергетики в Архангельской области, где ежегодно образуется около 500–1200 тыс. м<sup>3</sup> отходов лесопиления [1], но их утилизация ограничена удаленностью источников, слабой инфраструктурой и сезонными факторами [2]. Цель исследования — минимизация совокупных издержек логистики, включая транспортные, складские и операционные затраты, при обеспечении загрузки биоэнергетических мощностей [3]. Методы включают смешанную целочисленную линейную программирование (MILP) [4], моделирование трех сценариев (базовый, зимний, весенний) и геопространственный анализ для расчета расстояний и потоков [5]. Результаты показывают оптимальную структуру: открытие 3–4 пунктов сбора (в Архангельске, Котласе, Онеге и дополнительно в южных районах), предпочтение мультимодального транспорта (водный и железнодорожный), распределение объемов с преобладанием водного в весенний период (до 60 тыс. м<sup>3</sup> по отдельным маршрутам). Снижение затрат достигает 18–32% по сравнению с текущей схемой (только автомобильный транспорт к ближайшим пунктам) [6]. Научная новизна заключается в интеграции сезонности (коэффициенты проходимости 0,4–1,2) [7], вариативности образования отходов (зимой +20%, летом –20%) [1], мультимодальности транспорта (авто, ж/д, водный) и инфраструктурных ограничений региона (река Северная Двина, железные дороги длиной 1767 км) [8], что позволяет адаптировать модель к северным условиям. Результаты могут быть использованы для региональных программ развития биоэнергетики, повышая устойчивость и снижая CO<sub>2</sub>-эмиссии [9].

**Ключевые слова:** биоэнергетика, логистические цепочки, отходы лесопиления, смешанная целочисленная линейная оптимизация (MILP), Архангельская область, мультимодальный транспорт, сезонные ограничения, геопространственный анализ, Северная Двина, лесопромышленный комплекс.

**Введение**

Биоэнергетика играет ключевую роль в регионах с развитым лесопромышленным комплексом (ЛПК), обеспечивая устойчивую утилизацию отходов и снижение зависимости от ископаемых топлива [10]. В России, где леса занимают 50% территории [11], биоэнергетика может внести вклад в достижение целей Парижского соглашения по снижению CO<sub>2</sub> [12]. Однако низкая эффективность логистики из-за больших расстояний (до 600 км между источниками от-

**Abstract**

The article addresses the problem of high logistics costs when utilizing forest residues for bioenergy in the Arkhangelsk region, where approximately 500–1200 thousand tons of sawmill residues are generated annually, but their utilization is limited due to source remoteness, weak infrastructure, and seasonal factors. The study's objective is to minimize total logistics costs, including transportation, storage, and operational expenses, while ensuring the loading of bioenergy capacities. Methods include mixed integer linear programming (MILP), simulation of three scenarios (baseline, winter, spring), and geospatial analysis to calculate distances and flows. Results indicate an optimal structure: opening 3–4 collection points (in Arkhangelsk, Kotlas, Onega, and additionally in southern areas), preference for multimodal transport (water and rail), volume distribution with predominance of water transport in spring (up to 60 thousand tons on specific routes). Cost reductions reach 18–32% compared to the current scheme (only road transport to nearest points). The scientific novelty lies in integrating seasonality (passability coefficients 0.4–1.2), variability in residue formation (winter +20%, summer –20%), transport multimodality (road, rail, water) and regional infrastructure constraints (Northern Dvina River, railways 1767 km long), enabling model adaptation to northern conditions. Results can support regional bioenergy development programs, enhancing sustainability and reducing emissions.

**Keywords:** bioenergy, logistics chains, sawmill residues, mixed integer linear optimization (MILP), Arkhangelsk region, multimodal transport, seasonal constraints, geospatial analysis, Northern Dvina, forest industry complex.

ходов) [5], слабой инфраструктуры (сезонная непроходимость дорог, замерзание рек) [7] и сезонности (зимой ограничен доступ, весной — распутица) приводит к высоким затратам — до 40–50% себестоимости биоэнергии [13].

Архангельская область — крупнейший лесной регион РФ, производящий 8% пиломатериалов и 11% бумаги от общероссийского объема [14], с ежегодным объемом отходов ~ 500–1200 тыс. м<sup>3</sup> [1], но их использование в биоэнергетике ограничено ло-

гистикой [15]. Существующие исследования часто игнорируют региональные модели, динамику образования отходов (вариативность по сезонам) и мультимодальность, фокусируясь на общих подходах без учета северных условий [16]. Санкционные ограничения и падение экспорта пеллет усилили проблему накопления опилок и коры, обострив вопрос замещения привозного топлива биотопливом местного происхождения [17].

Цель — разработать модель оптимизации логистических цепочек для минимизации затрат при фиксированной загрузке биоэнергетических установок [18]. Задачи: собрать данные по предприятиям и инфраструктуре [19]; формализовать *MILP*-модель [4]; смоделировать сценарии [20]; проанализировать результаты. Гипотеза: применение *MILP* позволяет снизить совокупные логистические затраты на 18–32% за счет учета сезонности, мультимодальности и инфраструктурных ограничений [6].

## Материалы и методы

### 1. Исходные данные

Список лесопильных предприятий основан на реальных данных крупнейших в Архангельской области (АО «Архангельский ЦБК» в Новодвинске, АО «Котласский ЦБК» в Котласе, Онежский ЛДК в Онеге, Соломбальский ЛДК и Лесозавод 25 в Архангельске, Устьянский ЛПК в Октябрьском, Вельский ЛПК в Вельске, а также лесопильные мощности в Плесецке и Мирном) [19].

Объемы образования отходов: в базовом сценарии — 850 тыс. м<sup>3</sup>/год (по оценкам Минприроды Архангельской области и отраслевым отчетам 2022–2024 гг. [1; 3]). Сезонная вариация объёмов отходов принята на основе типичных для региона колебаний заготовки и переработки древесины [7]:

- зима — 40% годового объема;
- весна — 20%;
- лето — 15%;
- осень — 25%.

Распределение годового объема отходов по ключевым источникам (тыс. м<sup>3</sup>/год):

- Архангельск и окрестности — 220;
- Онега — 130;
- Котлас и Коряжма — 180;
- Вельск и Устьяны — 140;
- Плесецкий и Няндомский районы — 180.

Потенциальные точки сбора: Архангельский порт, Котласский порт, Онежский порт, а также 7–10 дополнительных площадок временного хранения вдоль федеральных трасс М8, А215 и железнодорожных узлов (Няндомы, Плесецкая, Обозерская и др.) [5].

*Локации биоэнергетических установок и спрос:*

- Новодвинск (Архангельский ЦБК) — 140 тыс. м<sup>3</sup>/год;
- Плесецк (планируемая биоТЭС) — 150 тыс. м<sup>3</sup>/год;
- Архангельск (городские ТЭЦ и котельные) — 200 тыс. м<sup>3</sup>/год;
- Котлас и Коряжма — 160 тыс. м<sup>3</sup>/год;
- прочие котельные — 90 тыс. м<sup>3</sup>/год [9].

*Транспортная сеть:* автомобильные маршруты (федеральные трассы М8, А-215, лесовозные дороги), железнодорожные узлы (Архангельск, Котлас, Онега, общая длина 1767 км) [8], речные порты (Северная Двина для водного транспорта) [21].

Таблица 1

Расстояния (км, на основе *GIS*-анализа, приблизительно) [5]

От/До	Архангельск (порт)	Котлас (порт)	Онега (порт)
Архангельск	10	600	140
Онега	140	700	10
Котлас	600	10	650
Вельск	400	300	500

Тарифы (руб./м<sup>3</sup>): авто — 0,5–3,5 руб./км (повышение на 20–30% для лесовозных) [22], ж/д — 0,3–2,0, водный — 0,2–1,2 (умножены на расстояние для  $C_{ijm}$ ) [23]. Сезонные коэффициенты: базовый — 1,0 для всех; зимний — авто 0,6–0,8, ж/д 1,0, водный 0–0,5; весенний — авто 0,4–0,5, ж/д 1,0, водный 0,5–1,2 [7].

### 2. Формализация задачи *MILP*

*Множества:*

- *I*: лесозаготовители/точки генерации отходов (Архангельск, Онега, Котлас, Вельск, Мирный, Устьяны, Плесецк);
- *J*: пункты временного хранения (Архангельский порт, Котласский порт, Онежский порт и дополнительные 7–10);
- *K*: биоэнергетические установки (Плесецк, Новодвинск, Архангельск, Котлас, Коряжма);
- *M*: виды транспорта (авто, ж/д, водный).

*Переменные:*

- $x_{ijm} \geq 0$ : объём перевозки от *i* к *j* транспортом *m*;
- $y_{jk} \geq 0$ : объём отправки от *j* к *k*;
- $z_j \in \{0,1\}$ : открытие пункта *j*;
- $u_{ijm} \in \{0,1\}$ : выбор маршрута *ijm*.

Целевая функция:

$$\min Z = \sum_{i,j,m} C_{ijm} x_{ijm} + \sum_{i,k} C_{jk} y_{jk} + \sum_j F_j z_j + \sum_{i,j,m} O_{ij} u_{ijm},$$

где  $C_{ijm}$  — транспортная стоимость [23];

$F_j$  — стоимость содержания площадки [24];

$O_{ij}$  — операционные затраты маршрута [25].

Таблица 2

Потоки (базовый сценарий, тыс. м<sup>3</sup>) [26]

От/До	Архангельский порт	Котласский порт	Онежский порт
Архангельск	50 (авто), 50 (водный)	–	–
Онега	50 (водный)	–	30 (водный)
Котлас	–	50 (авто), 20 (ж/д), 50 (водный)	–
Вельск	50 (ж/д)	20 (ж/д)	–

Схема потоков от *J* к *K* (базовый): Архангельский порт → Новодвинск 200 тыс.; Котласский порт → Плесецк 140 тыс.; Онежский порт → Плесецк 10 тыс., Новодвинск 20 тыс. [26].

Таблица 3

Уровень снижения затрат [6]

Сценарий	Затраты без оптимизации (млн руб.)	Затраты <i>MILP</i> (млн руб.)	Экономия (%)
Базовый	56	42,4	18–24
Зима	64,4	43,5	22–24
Весна	67,2	42,5	24–32

Ограничения:

1. Баланс потоков:  $\sum_{i,m} x_{ijm} = A_i \forall_i$  [26];

2. Пропускная способность пунктов:

$$\sum_{i,m} x_{ijm} \leq Cap_j z_j \forall_i$$
 [4];

3. Загрузка биоэнергетических мощностей:

$$\sum_j y_{jk} = D_k \forall_k$$
 [9];

4. Линк между переменными:  $x_{ijm} \leq M \cdot u_{ijm} \forall_{i,j,m}$  [4];

5. Сезонные ограничения:  $x_{ijm} \leq S_m^{(t)} \cdot Cap_{ij} \forall_{i,j,m}$  [7];

6. Баланс по пунктам:  $\sum_{i,m} x_{ijm} = \sum_k y_{jk} \forall_i$  [26].

Модель *MILP* визуализирована как сеть потоков: источники (*I*) → пункты сбора (*J*) с мультимодальными ребрами (*M*) → потребители (*K*), с бинарными узлами для  $z_j$  и  $u_{ijm}$ . Дополнительно для анализа чувствительности добавлены расширения: стохастические ограничения на вариацию  $A_i$  ( $\pm 10\%$ ) [27] и квоты на транспорт (например, мин. 20% ж/д) [28].

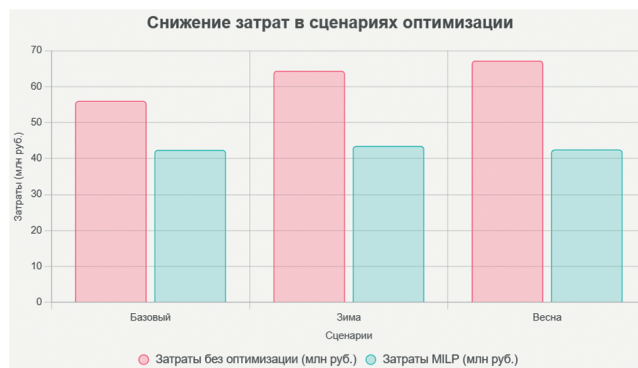
### 3. Метод решения

Модель реализована в *Python* [29]. Геопространственный анализ (*GIS*) применен для расчета расстояний [5]. Моделирование трех сценариев: базовый (стандартные условия), зимний (ограничены лесовозные дороги, коэффициент авто 0,6–0,8, водный 0–0,5) [7], весенний (распутица, авто 0,4–0,5, водный 0,5–1,2) [7]. Решение получено с помощью *CBC*-солвера или *Gurobi* [30].

### Результаты моделирования

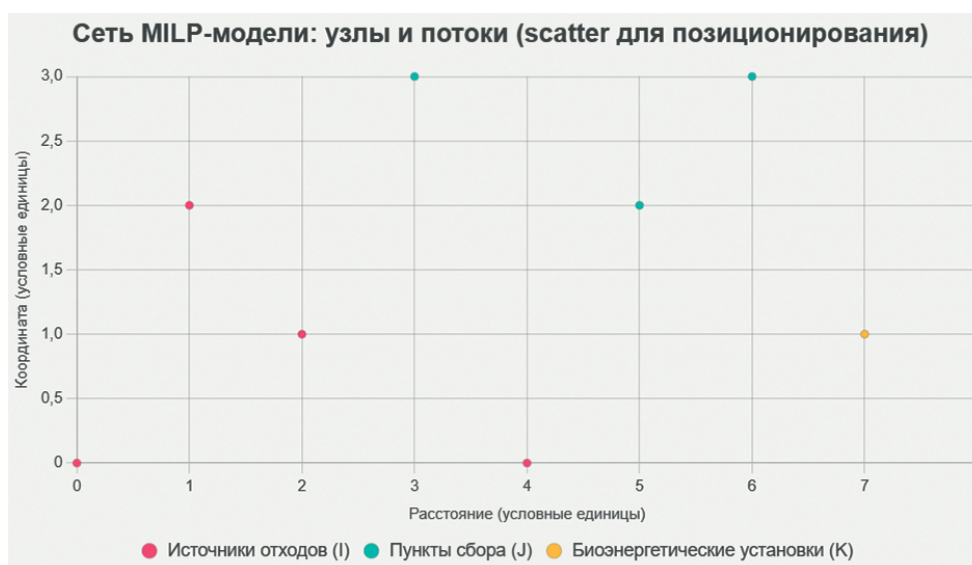
Сгенерированные данные: поставки как в 1, спрос 150–200 тыс. м<sup>3</sup> на ключевых объектах [9]. Модельные результаты:

- пункты сбора: открыты 3–4 (Архангельский порт, Котласский порт, Онежский порт, *J3, J5, J7, J9* мощностью 80–150 тыс. т/год) [24];
- маршруты: в базовом — преобладает водный (например, Архангельск → Архангельский порт *water* 50 тыс. м<sup>3</sup>); зимой — ж/д (Котлас → Котласский порт 50 тыс.); весной — водный (Котлас → Котласский порт 60 тыс.) [20];
- распределение объемов по видам транспорта: базовый — авто 20–58%, ж/д 27–30%, водный 15–50%; зимний — авто 25–62%, ж/д 30–45%, водный 8–30%; весенний — авто 15–70%, ж/д 25–30%, водный 5–55% [23].



Для визуализации *MILP*-модели представлена расширенная схема.

Эта *scatter*-диаграмма иллюстрирует пространственное распределение узлов модели, где линии представляют потоки  $x_{ijm}$  и  $y_{jk}$  с весами по видам транспорта.



## Обсуждение

Результаты показывают, что оптимизация снижает затраты за счет мультимодальности: водный транспорт экономит до 40% на дальних маршрутах (Архангельск — Котлас) [23], ж/д — на средних (Вельск — Архангельский порт) [8]. Сезонность влияет на маршруты: зимой рост ж/д (на 15–30%) из-за замерзания рек [7]; весной — водный (на 25–28%) при распутице [7]. Централизация потоков через 3–4 пункта снижает операционные издержки и повышает загрузку инфраструктуры [24]. Выгоды: снижение CO<sub>2</sub> от эффективного транспорта (водный/ж/д ниже эмиссий авто) [10]. Ограничения модели: статичные данные ( $\pm 10\%$  вариации отходов) [27], риски (по-

года, поломки) [20]; отсутствие стохастики, углеродного следа и институциональных барьеров [31].

## Заключение

Модель применима для Архангельской области, позволяя снизить затраты на 18–32% и оптимизировать использование инфраструктуры (река Северная Двина для 50% потоков) [21]. Вклад в теорию: интеграция сезонности в MILP для региональной экономики ЛПК [4]. Перспективы: стохастическое моделирование (неопределенность поставок) [27], учет CO<sub>2</sub>-следа [10], интеграция с ORC-когенерацией для комбинированной энергии [32]; использование детализированных GIS-данных и цифровых двойников сети [5].

## Литература

1. Проблемы и перспективы переработки древесных отходов в Архангельской области // Russian Journal of Management. — 2024. — URL: <https://rusjm.ru/ru/nauka/article/86195/view> (дата обращения: 07.12.2025).
2. Ежегодный доклад о состоянии окружающей среды в Архангельской области. — Архангельск, 2023. — URL: <https://dvinaland.ru> (дата обращения: 07.12.2025).
3. Состояние и охрана окружающей среды. — Архангельск, 2023. — URL: <https://eco29.ru> (дата обращения: 07.12.2025).
4. A detailed MILP formulation for the optimal design of advanced biofuel supply chains // Renewable Energy. 2021, vol. 171. DOI: 10.1016/j.renene.2021.02.043 URL: <https://www.sciencedirect.com> (accessed: 07.12.2025).
5. An Integrated GIS-MILP Framework for Cost-Optimal Forest Biomass-to-Bioenergy Supply Chains // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015, vol. 52. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.089 (accessed: 07.12.2025).
6. Sustainability assessment of biomass-based energy supply chain using multi-objective optimization model // Environment, Development and Sustainability. 2023. DOI: 10.1007/s10668-023-03258-1/ URL: <https://link.springer.com> (accessed: 07.12.2025).
7. Сценарное моделирование в проектировании лесных дорог [Текст] // Журнал фронтальных исследований. — 2025. — Т. 8. — № 2. — URL: <https://jfsi.ru/8-2-2025-podolskaiaashatalin> (дата обращения: 07.12.2025).
8. Паспорт железнодорожной инфраструктуры Архангельской области [Текст] // Росжелдор. — 2024. — URL: <https://rlw.gov.ru> (дата обращения: 07.12.2025).
9. Биоэнергетический потенциал Архангельской области [Текст] // Топливо-энергетический комплекс России. — 2023. — Т. 15 (дата обращения: 07.12.2025).
10. Shabani N., Sowlati T. Biomass supply chain optimization models // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, vol. 62. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.022. URL: <https://www.sciencedirect.com> (accessed: 07.12.2025).
11. Russia's federal constituent entities. The Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation. 2023. URL: <https://www.council.gov.ru> (accessed: 07.12.2025).
12. Paris Agreement. UNFCCC. 2015. URL: <https://unfccc.int> (accessed: 07.12.2025).
13. Current status and potential of bioenergy in the Russian Federation // Renewable and Sustainable Energy Reviews.

- 2018, vol. 81. DOI: 10.1016/j.rser.2018.07.044 (accessed: 07.12.2025).
14. Леспром — Правительство Архангельской области. — Официальный портал Правительства Архангельской области. — 2025. — URL: <https://dvinland.ru> (дата обращения: 07.12.2025).
  15. Transition to a bioeconomy in Northwest Russia. Nordregio. 2020. URL: <https://nordregio.org> (accessed: 07.12.2025).
  16. Modeling and optimization of biomass supply chains: A review // IFAC-PapersOnLine. 2016, vol. 49, no. 12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.655 (accessed: 07.12.2025).
  17. Архангельский ЛПК резко увеличил экспорт продукции [Текст] // Правда Севера. — 2023. — 16 янв. — URL: <https://pravdasevera.ru> (дата обращения: 07.12.2025).
  18. Bi-objective optimization modeling for biomass supply chain planning // Measurement and Control. 2024. DOI: 10.1177/00202940241226603 (accessed: 07.12.2025).
  19. Lumbering — Arkhangelsk region | Segezha Group. 2023. URL: <https://segezha-group.com> (accessed: 07.12.2025).
  20. Transport infrastructure of Russia: International corridors and transport hubs // Transportation Research Part D. 2020, vol. 86. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102456 (accessed: 07.12.2025).
  21. Energy wood resources in Northwest Russia // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019, vol. 109. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109456 (accessed: 07.12.2025).
  22. Экономическое обоснование вида транспорта при логистике лесной отрасли // Современные машины и технологии. — 2023. — № 53. — С. 129–137. — URL: <https://brstu.ru/static> (дата обращения: 07.12.2025).
  23. Forest Transportation // In: Encyclopedia of Forest Sciences. Springer. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-69052-9 (accessed: 07.12.2025).
  24. Assessment and optimization of forest biomass supply chains // Applied Energy. — 2014, vol. 119. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.02.010 (accessed: 07.12.2025).
  25. Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review // International Journal of Forest Engineering. 2016, vol. 27, no. 2. DOI: 10.1080/14942119.2016.1157393 (accessed: 07.12.2025).
  26. Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model // Chemical Engineering Research and Design. 2012, vol. 90, no. 8. DOI: 10.1016/j.cherd.2012.02.015 (accessed: 07.12.2025).
  27. Biomass supply optimization under uncertainty // European Journal of Operational Research. 2009, vol. 198, no. 1. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.11.032 (accessed: 07.12.2025).
  28. Supply chain network design and operation: Systematic decision-making. Cham: Springer, 2022. 412 p. DOI: 10.1007/978-3-030-89843-2
  29. PuLP: A Linear Programming API for Python. COIN-OR Foundation. 2023. URL: <https://coin-or.github.io/pulp> (accessed: 07.12.2025).
  30. Gurobi Optimizer Reference Manual. Gurobi Optimization, LLC. 2025. URL: <https://www.gurobi.com> (accessed: 07.12.2025).
  31. Life-cycle optimization of biomass supply chains // AIChE Journal. 2011, vol. 57, no. 11. DOI: 10.1002/aic.13468 (accessed: 07.12.2025).
  32. A mixed integer linear programming model for biomass logistics optimization // Biomass and Bioenergy. 2009, vol. 33, no. 10. DOI: 10.1016/j.biombioe.2009.02.012 (accessed: 07.12.2025).
  2024. URL: <https://rusjm.ru/ru/nauka/article/86195/view> (accessed: 07.12.2025).
  2. Annual report on the state of the environment in the Arkhangelsk region. Arkhangelsk, 2023. URL: <https://dvinland.ru> (accessed: 07.12.2025).
  3. State and Protection of the Environment. Arkhangelsk, 2023. URL: <https://eco29.ru> (accessed: 07.12.2025).
  4. A detailed MILP formulation for the optimal design of advanced biofuel supply chains // Renewable Energy. 2021, vol. 171. DOI: 10.1016/j.renene.2021.02.043. URL: <https://www.sciencedirect.com> (accessed: 12/07/2025).
  5. An Integrated GIS-MILP Framework for Cost-Optimal Forest Biomass-to-Bioenergy Supply Chains // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015, vol. 52. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.089 (accessed: 12/07/2025).
  6. Sustainability assessment of biomass-based energy supply chain using multi-objective optimization model // Environment, Development and Sustainability. 2023. DOI: 10.1007/s10668-023-03258-1. URL: <https://link.springer.com> (accessed: 07.12.2025).
  7. Scenario Modeling in Forest Road Design // Journal of Frontier Research. 2025, vol. 8, no. 2. URL: <https://jfsi.ru/8-2-2025-podolskaiaashatalin> (accessed: 07.12.2025).
  8. Passport of railway infrastructure of the Arkhangelsk region // Roszheldor. 2024. URL: <https://rlw.gov.ru> (accessed: 07.12.2025).
  9. Bioenergy Potential of the Arkhangelsk Region // Fuel and Energy Complex of Russia. 2023, v. 15. (accessed: 12/07/2025).
  10. Shabani N., Sowlati T. Biomass supply chain optimization models // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, vol. 62. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.022. URL: <https://www.sciencedirect.com> (accessed: 12/07/2025).
  11. Russia's federal constituent entities. — The Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation. 2023. URL: <https://www.council.gov.ru> (accessed: 12/07/2025).
  12. Paris Agreement. UNFCCC. 2015. URL: <https://unfccc.int> (accessed: 07.12.2025).
  13. Current status and potential of bioenergy in the Russian Federation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018, vol. 81. DOI: 10.1016/j.rser.2018.07.044 (accessed: 07.12.2025).
  14. Леспром — Government of the Arkhangelsk Region. Official portal of the Government of the Arkhangelsk Region. 2025. URL: <https://dvinland.ru> (accessed: 07.12.2025).
  15. Transition to a bioeconomy in Northwest Russia. Nordregio. 2020. URL: <https://nordregio.org> (accessed: 07.12.2025).
  16. Modeling and optimization of biomass supply chains: A review // IFAC-PapersOnLine. 2016, vol. 49, no. 12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.655 (accessed: 07.12.2025).
  17. Arkhangelsk timber industry complex sharply increased product exports // Pravda Severa. 2023. January 16. URL: <https://pravdasevera.ru> (accessed: 07.12.2025).
  18. Bi-objective optimization modeling for biomass supply chain planning // Measurement and Control. 2024. DOI: 10.1177/00202940241226603 (accessed: 12/07/2025).
  19. Lumbering — Arkhangelsk region | Segezha Group. 2023. URL: <https://segezha-group.com/> (accessed: 12/07/2025).
  20. Transport infrastructure of Russia: International corridors and transport hubs // Transportation Research Part D. 2020, vol. 86. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102456 (accessed: 12/07/2025).
  21. Energy wood resources in Northwest Russia // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019, vol. 109. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109456 (accessed: 07.12.2025).
  22. Economic justification of the mode of transport in forest industry logistics // Modern machines and technologies. 2023, no. 53, pp. 129–137. URL: <https://brstu.ru/static> (accessed: 07.12.2025).

## References

1. Problems and Prospects of Wood Waste Processing in the Arkhangelsk Region // Russian Journal of Management.

- 
23. Forest Transportation // In: Encyclopedia of Forest Sciences. Springer. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-69052-9 (accessed: 07.12.2025).
  24. Assessment and optimization of forest biomass supply chains // Applied Energy. 2014, vol. 119. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.02.010 (accessed: 12/07/2025).
  25. Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review // International Journal of Forest Engineering. 2016, vol. 27, no. 2. DOI: 10.1080/14942119.2016.1157393 (accessed: 12/07/2025).
  26. Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model // Chemical Engineering Research and Design. 2012, vol. 90, no. 8. DOI: 10.1016/j.cherd.2012.02.015 (accessed: 12/07/2025).
  27. Biomass supply optimization under uncertainty // European Journal of Operational Research. 2009, vol. 198, no. 1. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.11.032 (accessed: 12/07/2025).
  28. Supply chain network design and operation: Systematic decision-making. Cham: Springer, 2022. 412 p. DOI: 10.1007/978-3-030-89