

**№20 (3)**

ISSN 2307-0048

# **Resources and Technology**

## **научный журнал**

**2023**

# **Resources and Technology**

**№20 (3)**

Сетевое издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 - 57768 от 18.04.2014.

Учредитель – ФГБОУ ВО Петрозаводский государственный университет.

Адрес электронной почты журнала: [rt@petrsu.ru](mailto:rt@petrsu.ru). Номер телефона: 8 (8142) 76-97-11.

# **Resources and Technology**

**№20 (3)**

Mass media registration certificate #ФС77-57768 (18/04/2014).

Founder: Petrozavodsk State University.

E-mail: rt@petrsu.ru. Phone number: 8 (8142) 76-97-11.

## **Редакционная коллегия:**

### **Главный редактор:**

**Васильев Сергей Борисович** (Россия) доктор технических наук, профессор, [servas@psu.karelia.ru](mailto:servas@psu.karelia.ru).

### **Заместитель главного редактора:**

**Колесников Геннадий Николаевич** (Россия) доктор технических наук, профессор, [kgn@psu.karelia.ru](mailto:kgn@psu.karelia.ru).

**Тихонов Евгений Андриянович** (Россия) кандидат технических наук, доцент, [tihonov@psu.karelia.ru](mailto:tihonov@psu.karelia.ru).

## **Редакционный совет:**

**Гаврилова Ольга Ивановна** (Россия) доктор сельскохозяйственных наук, профессор, [ogavril@mail.ru](mailto:ogavril@mail.ru).

**Добрынина Оксана Леонидовна** (Россия) Кандидат педагогических наук, доцент, [oksdobr@mail.ru](mailto:oksdobr@mail.ru).

**Григорьев Игорь Владиславович** (Россия) Доктор технических наук, профессор, [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru).

**Карвинен Сари** (Финляндия) Магистр естественных наук, [sari.karvinen@metla.fi](mailto:sari.karvinen@metla.fi).

**Левин Валерий Михайлович** (Мексика) Доктор физико-математических наук, профессор, [vlevine@imp.mx](mailto:vlevine@imp.mx).

**Ледницкий Андрей Викентьевич** (Республика Беларусь) Кандидат экономических наук, доцент, [ledniz@inbox.ru](mailto:ledniz@inbox.ru).

**Мануковский Андрей Юрьевич** (Россия) Доктор технических наук, профессор, [mayu1964@mail.ru](mailto:mayu1964@mail.ru).

**Мельник Пётр Григорьевич** (Россия) Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, [melnik\\_petr@bk.ru](mailto:melnik_petr@bk.ru).

**Саастамойнен Олли** (Финляндия) Доктор наук, [olli.saastamoinen@uef.fi](mailto:olli.saastamoinen@uef.fi).

**Саливоник Александр Владимирович** (Россия) Кандидат технических наук, [salivonik@rambler.ru](mailto:salivonik@rambler.ru).

**Сюнёв Владимир Сергеевич** (Россия) Доктор технических наук, профессор, [sionnev@psu.karelia.ru](mailto:sionnev@psu.karelia.ru).

## **Editorial staff:**

### **Editor-in-chief:**

**Prof. Dr. Vasilyev, Sergey** (Russia), [servas@psu.karelia.ru](mailto:servas@psu.karelia.ru).

### **Deputy editor:**

**Prof. Dr. Kolesnikov, Gennady** (Russia), [kgn@psu.karelia.ru](mailto:kgn@psu.karelia.ru).

**Prof. Dr. Tikhonov, Eugeny** (Russia), [tihonov@psu.karelia.ru](mailto:tihonov@psu.karelia.ru).

## **Editorial board:**

**Prof. Dr. Gavrilova, Olga I.** (Russia), [ogavril@mail.ru](mailto:ogavril@mail.ru).

**Dr. Dobrinina, Oksana** (Russia), [oksdobr@mail.ru](mailto:oksdobr@mail.ru).

**Prof. Dr. Grigoryev, Igor** (Russia), [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru).

**M. Sc. Karvinen, Sari** (Finland), [sari.karvinen@metla.fi](mailto:sari.karvinen@metla.fi).

**Prof. Dr. Levin, Valery** (Mexico), [vlevine@imp.mx](mailto:vlevine@imp.mx).

**Prof. Dr. Lednitskij, Andrej** (Belarus), [ledniz@inbox.ru](mailto:ledniz@inbox.ru).

**Prof. Dr. Manukovsky, Andrey** (Russia), [mayu1964@mail.ru](mailto:mayu1964@mail.ru).

**Dr. Melnik, Petr** (Russia), [melnik\\_petr@bk.ru](mailto:melnik_petr@bk.ru).

**Prof. Emeritus, Dr. Sc., Saastamoinen Olli** (Finland), [olli.saastamoinen@uef.fi](mailto:olli.saastamoinen@uef.fi).

**Prof. Dr. Salivonik, Alexander** (Russia), [salivonik@rambler.ru](mailto:salivonik@rambler.ru).

**Prof. Dr. Syunnev, Vladimir** (Russia), [siounnev@psu.karelia.ru](mailto:siounnev@psu.karelia.ru).

## **Содержание №3, Т. 20, 2023**

<i>Шкуро А. Е., Глухих В. В., Кулаженко Ю. М., Захаров П. С.</i>	<i>Биоразлагаемые композиты с полимерной фазой поливинилхлорида и лигноцеллюлозными наполнителями</i>	1 - 14
<i>Каляшов В. А., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Дмитриев А. С., Григорьева О. И.</i>	<i>Геотехническое обоснование работоспособности трелёвочных волоков и технологических коридоров на склонах оттаивающих почвогрунтов при работе лесных машин с колёсным и полугусеничным движителем</i>	15 - 31
<i>Катаров В. К., Рожин Д. В., Сюнёв В. С.</i>	<i>Оптимальное проектирование сети лесных дорог: от методов к решениям</i>	32 - 47
<i>Тюкавина О. Н., Корепин Д. Ю.</i>	<i>Продолжительность жизни хвои сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris L.</i>)</i>	48 - 59
<i>Ольхин Ю. В., Гавrilова О. И., Грязькин А. В.</i>	<i>Использование беспилотного летательного аппарата для оценки процесса формирования молодняков на вырубках</i>	60 - 75
<i>Попиков П. И., Четверикова И. В., Евсиков И. Д., Богданов Д. С., Мозговой Н. В.</i>	<i>Исследование и обоснование компоновки и параметров гидропривода механизма подъёма лесного манипулятора</i>	76 - 93
<i>Лукашевич В. М., Кузнецов А. В.</i>	<i>Анализ нарушений лесного законодательства на примере Республики Карелия</i>	94 - 108

## **Content №3, Vol. 20, 2023**

<i>Shkuro A. E., Glukhikh V. V., Kulazhenko J. M., Zakharov P. S.</i>	<i>Biodegradable Composites with Polyvinyl Chloride Polymer Phase and Lignocellulose Fillers</i>	1 - 14
<i>Kalyashov V., Shapiro V., Grigorev I., Kunickaya O., Dmitriev A., Grigoreva O.</i>	<i>Geotechnical substantiation of the operability of skidding drags and technological corridors on the slopes of thawing soils during the operation of forest machines with wheeled and semi-tracked propulsion</i>	15 - 31
<i>Katarov V., Rozhin D., Siounev V.</i>	<i>Optimal planning of a forest road network: from methods to solutions</i>	32 - 47
<i>Tyukavina O. N., Korepin D. Y.</i>	<i>Longevity of common pine needle (Pinus sylvestris L.)</i>	48 - 59
<i>Olkhin Y. V., Gavrilova O. I., Gryazkin A. V.</i>	<i>The use of unmanned aerial vehicles to assess young trees formation in clean cutting areas</i>	60 - 75
<i>Popikov P., Chetverikova I., Evsikov I., Bogdanov D., Mozgovoy N.</i>	<i>Investigation and justification of the layout and parameters of the hydraulic drive of the lifting mechanism of the forest manipulator</i>	76 - 93
<i>Lukashevich V. M., Kuznetsov A. V.</i>	<i>Analysis of forest legislation violations using the Republic of Karelia as an example</i>	94 - 108

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6923

УДК 691.175

*Статья*

## **Биоразлагаемые композиты с полимерной фазой поливинилхлорида и лигноцеллюлозными наполнителями**

**Шкуро Алексей Евгеньевич**

*кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (Российская Федерация), shkuroae@m.usfeu.ru*

**Глухих Виктор Владимирович**

*доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (Российская Федерация), gluhihvv@m.usfeu.ru*

**Кулаженко Юлия Маратовна**

*аспирантка кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (Российская Федерация), kulazhenko.yuliya@mail.ru*

**Захаров Павел Сергеевич**

*аспирант кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (Российская Федерация), zaharovps@m.usfeu.ru*

*Получена: 14 марта 2023 / Принята: 11 августа 2023 / Опубликована: 19 августа 2023*

---

**Аннотация:** Способом решения проблемы утилизации отходов лесопромышленного и аграрного комплексов, а также пластиковых отходов производства и потребления товарной продукции представляется разработка рецептур новых композиционных материалов и совершенствование технологии их переработки. В связи с этим большой интерес представляют биоразлагаемые композиты с полимерными фазами синтетических и природных полимеров и различными лигноцеллюлозными наполнителями. В настоящей работе были рассмотрены вопросы биоразложения композитов с полимерными фазами

первичного и вторичного поливинилхлорида (ПВХ). В качестве наполнителей были использованы древесная мука, опилки бука, шелуха овса, фитомасса опавших листьев, сено естественных сенокосов. Образцы композитов были получены методами вальцевания и горячего прессования. Степень биоразложения полученных композитов определяли по величине потери массы после выдержки в активном грунте. Максимальное время выдержки образцов в грунте составило 120 суток. В результате исследования установлено, что использование пластификатора (дибутилфталата) позволяет увеличить показатель потери массы за 120 суток выдержки в грунте ненаполненного поливинилхлорида более чем в три раза. Введение в состав ПВХ лигноцеллюлозных наполнителей значительно увеличивает его степень разложения в грунте. Наибольшую степень биоразложения в активированном грунте демонстрируют образцы композитов с наполнителями недревесного происхождения. Для образцов композитов с полимерной фазой первичного ПВХ и шелухой овса потеря массы после выдержки в активированном грунте составляет 10,1 мас. %, с сеном луговых трав — 14,5 мас. %; для образца с полимерной фазой вторичного ПВХ (отходов эксплуатации потолочных панелей) — 24,6 мас. %. Для использованных в работе наполнителей было определено содержание лигнина, целлюлозы, гемицеллюлоз и минеральных веществ. Методом многофакторного регрессионного анализа были установлены закономерности влияния компонентного состава лигноцеллюлозного наполнителя на степень биоразложения компонента в грунте. Показано, что наибольшее влияние на биоразложение композитов с полимерной фазой первичного ПВХ оказывает содержание в наполнителе гемицеллюлоз. При этом увеличение содержания в наполнителе лигнина и целлюлозы приводит к снижению степени биоразложения композита. Влияния минеральных веществ в составе композита на его степень биоразложения не выявлено. Для образцов с полимерной фазой вторичного ПВХ основным фактором, определяющим степень биоразложения в грунте, является содержание в наполнителе гемицеллюлоз. Статистически достоверного влияния содержания лигнина и целлюлозы выявлено не было.

**Ключевые слова:** биоразложение; лигнин; целлюлоза; отходы; поливинилхлорид; наполнитель; композит

---

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6923

Article

## Biodegradable composites with polyvinyl chloride polymer phase and lignocellulose fillers

**Alexey Shkuro**

*Ph. D. in engineering, associate professor, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), shkuroae@m.usfeu.ru*

**Viktor Glukhikh**

*D. Sc. in engineering, professor, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), gluhihvv@m.usfeu.ru*

**Julia Kulazhenko**

*Ph. D. student, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), kulazhenkoyuliya@mail.ru*

**Pavel Zakharov**

*Ph. D. student, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), zaharovps@m.usfeu.ru*

*Received: 14 March 2023 / Accepted: 11 August 2023 / Published: 19 August 2023*

---

**Abstract:** The way to solve the problem of waste disposal from the timber industry and agrarian complexes, as well as plastic waste from the production and consumption of marketable products is to develop compositions of new composite materials and to improve technologies for their processing. Therefore, biodegradable composites with polymer phases of synthetic and natural polymers and various lignocellulosic fillers are of great interest. In the present work, the issues of biodegradation of composites with polymeric phases of primary and recycled polyvinyl chloride (PVC) were considered. Wood flour, beech sawdust, oat husks, biomass of fallen leaves, hay from natural haylands were used as fillers. Samples of composites were obtained by rolling and hot pressing. The degree of the resulting composites biodegradation was determined by the amount of weight loss after seasoning in active (nondormant) soil. The maximum exposure time of the samples in the soil was 120 days. As a result of the study, it was

The authors found that the use of a plasticizer (dibutyl phthalate) allows increasing the mass loss rate of unfilled polyvinyl chloride during its 120-day seasoning in the soil by more than three times. Introduction of lignocellulose fillers into the composition of PVC significantly increased its degree of decomposition in the soil. The highest degree of biodegradation in activated soil was demonstrated by samples of composites with fillers of non-wood origin. For samples of composites with a polymer phase of primary PVC and oat husk, the weight loss after seasoning in activated soil was 10.1 wt. %, with meadow grass hay – 14.5 wt. %; for a sample with a polymer phase of recycled PVC (waste from phased-out ceiling boards) – 24.6 wt. %. For the fillers used in the work, the contents of lignin, cellulose, hemicelluloses, and minerals were determined. Using the method of multivariate regression analysis, regularities were established for the influence of the component composition of lignocellulose filler on the degree of biodegradation of the component in the soil. It is shown that the content of hemicelluloses in the filler had the greatest effect on the biodegradation of composites with a polymer phase of primary PVC. At the same time, an increase in the content of lignin and cellulose in the filler resulted in a decrease in the degree of composite biodegradation. The influence of mineral substances in the composition of the composite on its degree of biodegradation was not revealed. For samples with a polymer phase of recycled PVC, the main factor determining the degree of biodegradation in the soil was the content of hemicelluloses in the filler. No statistically significant effect of lignin and cellulose content was found.

**Keywords:** biodegradation; lignin; cellulose; waste; polyvinyl chloride; filler; composite

---

## 1. Введение

Загрязнение окружающей среды относится к глобальным современным проблемам. Одним из методов решения данного вопроса является рациональное использование природных ресурсов, в т. ч. возобновляемых растительных ресурсов, содержащих целлюлозу и лигнин. Другой метод — использование отходов потребления и производства, в т. ч. лесопромышленного и аграрного, для получения товарной продукции. На сегодняшний день основная доля лигноцеллюлозных отходов используется в качестве топлива. Продукты их сгорания снижают качество атмосферного воздуха. Во многих странах, с целью уменьшения количества образующихся отходов, проводятся научные исследования по получению полимерных композиционных материалов (ПКМ) на их основе.

Согласно данным научных публикаций [1—3], прогнозируется значительный рост коммерческого интереса к производству материалов и изделий из композитов с термопластичными матрицами и лигноцеллюлозными наполнителями. При этом существует и экологический интерес, т. к. для производства композитов с термопластичными матрицами и лигноцеллюлозными наполнителями могут быть использованы отходы термопластичных полимеров (полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида и др.). Кроме того, изделия из них после эксплуатации могут повторно перерабатываться. Промышленность сталкивается с необходимостью переработки различных типов отходов, в т. ч. не только полимерных материалов [4], но и остатков биомассы леса [5] и сельского хозяйства [6]. Использование для производства товарной продукции из таких композитов является одним из наиболее эффективных и экономически целесообразных способов утилизации отходов.

Одним из наиболее перспективных синтетических полимеров с точки зрения использования отходов его эксплуатации для получения полимерных композиционных материалов является поливинилхлорид (ПВХ). По объёмам производства поливинилхлорид занимает третье место среди всех полимерных материалов [7]. Он применяется в электротехнике, упаковке, лёгкой и пищевой промышленности, машино- и судостроении, сельском хозяйстве, медицине и производстве стройматериалов. Широкое распространение во всех областях хозяйства обусловливает большое количество отходов поливинилхлорида, ежегодно накапливающихся на свалках и полигонах. Вторичная переработка поливинилхлорида сопряжена с рядом трудностей, связанных с относительно низкой термической стабильностью материала. При утилизации на свалках или полигонах и, особенно, при сжигании отходы поливинилхлорида могут образовывать токсичные хлорорганические соединения. Поэтому необходим поиск новых методов утилизации отходов ПВХ. Таким способом может стать использование отходов поливинилхлорида для получения композитов с лигноцеллюлозными наполнителями.

Для эффективной переработки отходов необходимо знание закономерностей влияния состава композита и технологических параметров получения изделий из композитов

с полимерной фазой первичного и вторичного ПВХ и лигноцеллюлозными наполнителями на их физико-механические свойства и степень биоразложения в грунте.

Целью настоящего исследования являлось установление закономерностей влияния компонентного состава лигноцеллюлозных наполнителей на физико-механические свойства и степень биоразложения в грунте композитов с полимерной фазой поливинилхлорида.

## 2. Материалы и методы

В качестве полимерной фазы при получении композитов в работе использованы суспензионный поливинилхлорид марки СИ-67 (ОАО «Саянхимпласт», ГОСТ 14332-78) и отходы эксплуатации потолочных панелей на основе поливинилхлорида, предоставленные ООО «ЭкоПласт-Урал» (г. Екатеринбург). В качестве пластификаторов использован дибутиловый эфир фталевой кислоты (дибутилфталат, ДБФ, ГОСТ 8728-77). Массовое соотношение между поливинилхлоридом и дибутилфталатом во всех опытах составляло 100 : 11 мас. ч.

В качестве наполнителей применялись:

- древесная мука хвойных пород марки 180 (ГОСТ 16361-87);
- мука шелухи овса марки 180 (ТУ 01.11.33-001-04058968-2017);
- фитомасса опавших листьев (представляет смесь листьев различных пород тополя и берёзы, собранную на территории студенческого городка Уральского государственного лесотехнического университета);
- сено трав естественных сенокосов (ООО «Идеал», ОСТ 10243-2000);
- опилки бук (УПМ УГЛТУ, г. Екатеринбург).

Образцы композитов получены смешением компонентов методом вальцевания при температуре 150—160 °C. Стандартные образцы для испытаний изготавливали методом горячего прессования при температуре 160—170 °C и давлении 5 МПа. Рецептуры композитов представлены в таблице 1.

Биодеградация образцов композитов оценивалась по величине потери их массы после экспонирования в активном грунте. Предварительно взвешенные образцы помещались в активный грунт на глубину 2—3 см в горизонтальном положении. После окончания срока выдержки образцы вынимались из грунта, очищались этиловым спиртом и сушились в течение суток при температуре 105 °C. Использовали активный грунт следующего состава: грунт садовый (ГОСТ Р 53381-2009) — 89 об. %, вода дистиллированная — 10 об. %, микробиологический препарат «Тамир» (ТУ 9291-002-70213832-2007) — 1 об. %. В состав препарата «Тамир» входят бактерии *Lactobacillus casei*, *Streptococcus lactis*, *Saccharomyces cerevisiae*, а также сапроптические микроорганизмы, ферменты и другие биологически активные вещества, способствующие разложению органических соединений. Микроорганизмы, входящие в состав препарата, не вирулентны, не токсичны и не являются патогенами. Препарат «Тамир» относится к IV классу опасности (малоопасные вещества).

Содержание химических веществ в исследуемых лигноцеллюлозных наполнителях определяли по методикам, приведённым в работе А. В. Вураско и соавт. [8].

**Таблица 1.** Рецептуры исследованных композитов

**Table 1.** Compositions of the studied composites

№ опыта	Полимерная матрица	Наполнитель	Содержание компонента, мас. ч.		
			Полимер	ДБФ	Наполнитель
1	ПВХ СИ-67	Без наполнителя	100,0	11,0	0,0
2		Без наполнителя	100,0	11,0	0,0
3		ДМ-180	100,0	11,0	111,0
4		Мука шелухи овса	100,0	11,0	111,0
5		Опилки букса	100,0	11,0	111,0
6		Опавшие листья	100,0	11,0	111,0
7		Сено луговых трав	100,0	11,0	111,0
8	Отходы эксплуатации потолочных панелей	Без наполнителя	100,0	11,0	111,0
9		ДМ-180	100,0	11,0	111,0
10		Мука шелухи овса	100,0	11,0	111,0
11		Опилки букса	100,0	11,0	111,0

Экспериментальные данные, полученные в результате проведённых исследований, были обработаны методом многофакторного регрессионного анализа. Для этого использовалась программа «STATISTICA 10.0».

### 3. Результаты

Результаты определения динамики потери массы образцами композитов после выдержки в активированном грунте в течение 120 суток для образцов с полимерной фазой поливинилхлорида марки СИ-67 представлены на рисунке 1, для образцов с полимерной фазой вторичного поливинилхлорида (отходов эксплуатации потолочных панелей) — на рисунке 2. Микрофотографии образцов композитов с полимерной фазой вторичного поливинилхлорида и 50 мас. % измельчённой шелухи до и после выдержки в активированном грунте отражены на фото 1.

Установленный химический состав некоторых использованных в работе лигноцеллюлозных наполнителей приведён в таблице 2.

Для установления закономерностей влияния химического состава наполнителя на степень биоразложения в грунте композитов с полимерными фазами первичного и вторичного ПВХ был проведён регрессионный анализ экспериментальных данных. По результатам регрессионного анализа для доверительной вероятности не менее 0,95 была разработана

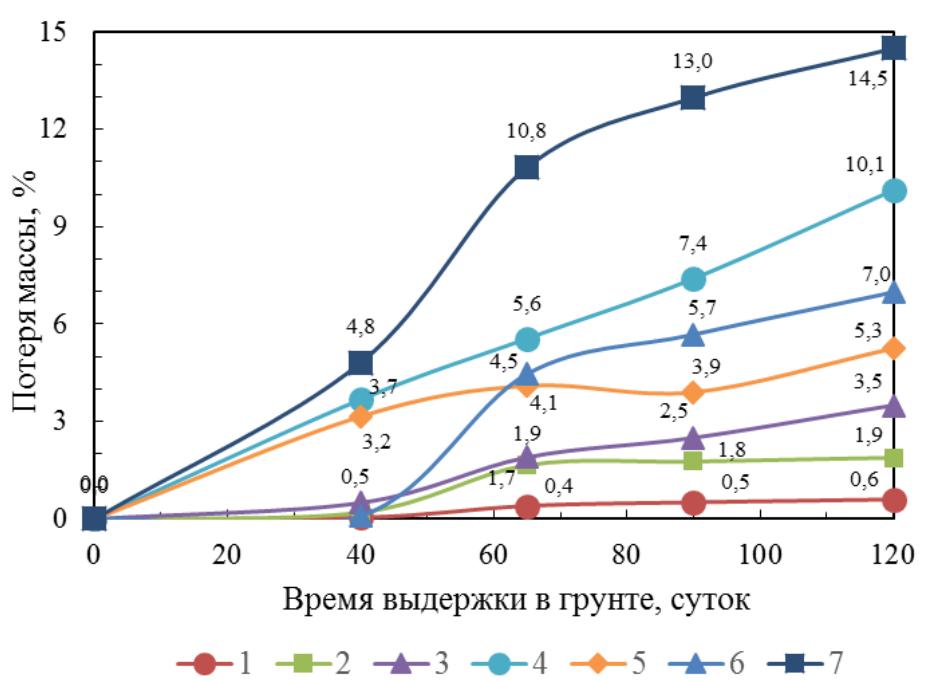
экспериментально-статистическая модель влияния компонентного состава наполнителя на потерю массы образцами композита с полимерной фазой поливинилхлорида со степенью наполнения 50 мас. %:

$$Y_1 = 1,91 \cdot Z_1 - 0,14 \cdot Z_2 + 0,35 \cdot Z_3 \quad (R^2=0,99), \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,50 \cdot Z_3 \quad (R^2=0,91), \quad (2)$$

где  $Y_1$  — потеря массы после 120 суток выдержки в активированном грунте образцами композита с полимерной фазой первичного ПВХ СИ-67, %;  $Y_2$  — потеря массы после 120 суток выдержки в активированном грунте образцами композита с полимерной фазой вторичного ПВХ (отходами потолочных панелей), %;  $Z_1$  — содержание целлюлозы в наполнителе, мас. %;  $Z_2$  — содержание лигнина в наполнителе, мас. %;  $Z_3$  — содержание гемицеллюлоз в наполнителе, мас. %.

Графическая интерпретация данных зависимостей представлена на рисунках 3—4.



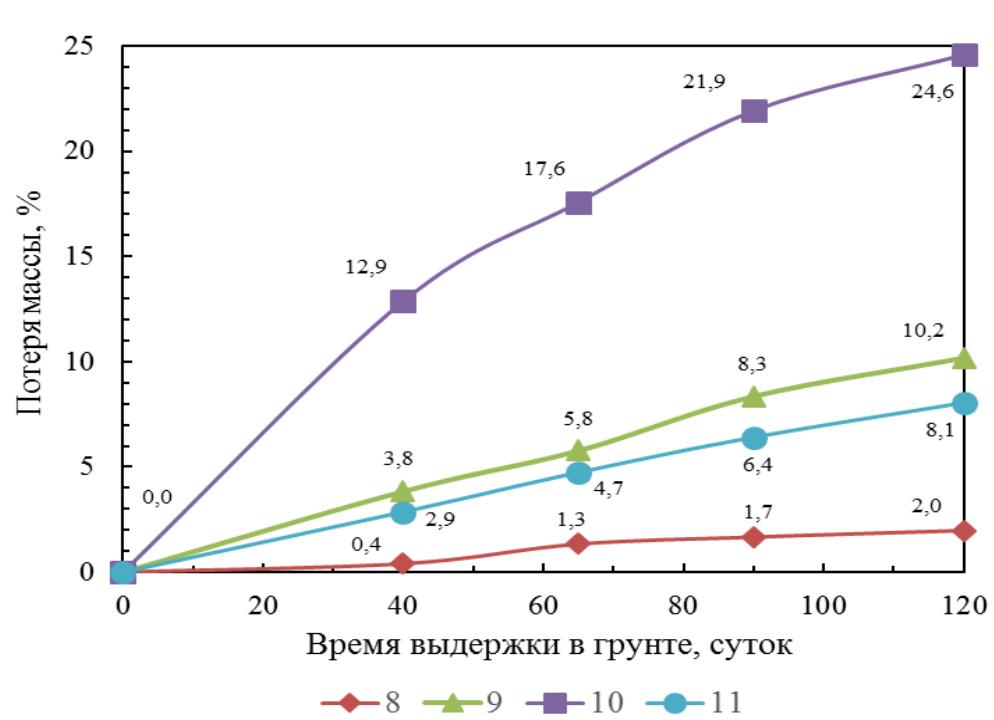
**Рисунок 1.** Динамика биоразложения образцов композитов с полимерной фазой пластифицированного поливинилхлорида СИ-67

**Figure 1.** Dynamics of biodegradation of composites samples with a polymer phase of plasticized polyvinyl chloride SI-67

**Таблица 2.** Химический состав использованных в работе наполнителей

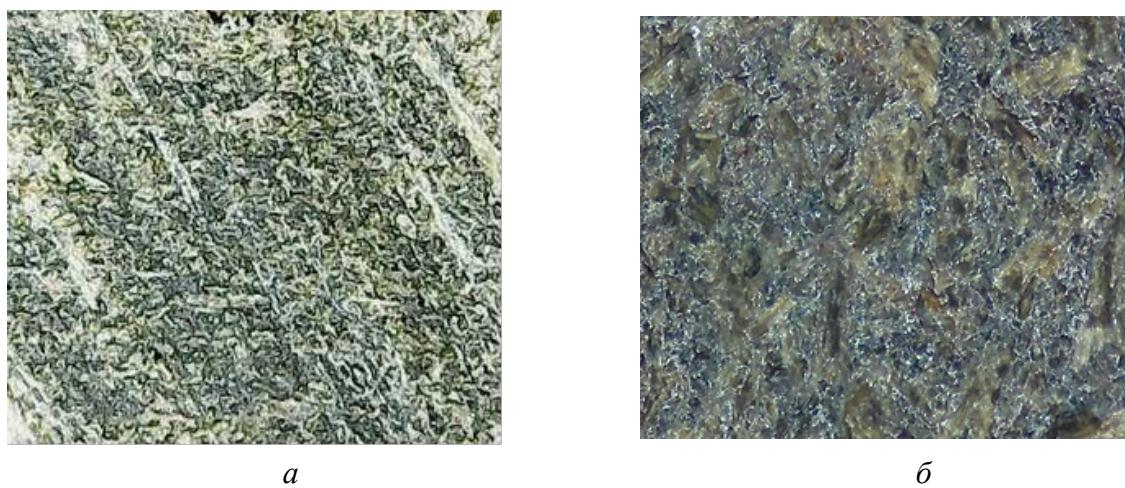
**Table 2.** Chemical composition of the fillers used in the study

Наполнитель	Содержание компонента, мас. %			
	Целлюлоза	Лигнин	Гемицеллюлозы	Минеральные вещества
Древесная мука марки 300	44,8	25,5	23,2	1,6
Опилки бука	44,2	23,3	28,4	1,5
Мука шелухи овса (ОМ-180)	28,2	20,2	38,8	8,9
Фитомасса опавших листьев	11,2	35,2	30,8	10,5
Сено луговых трав	27,5	14,2	46,8	4,9



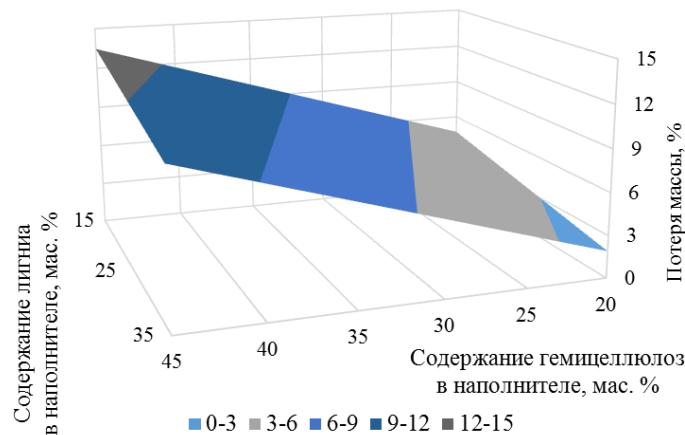
**Рисунок 2.** Динамика биоразложения образцов композитов с полимерной фазой вторичного поливинилхлорида

**Figure 2.** Dynamics of biodegradation of composites samples with a polymer phase of secondary polyvinyl chloride



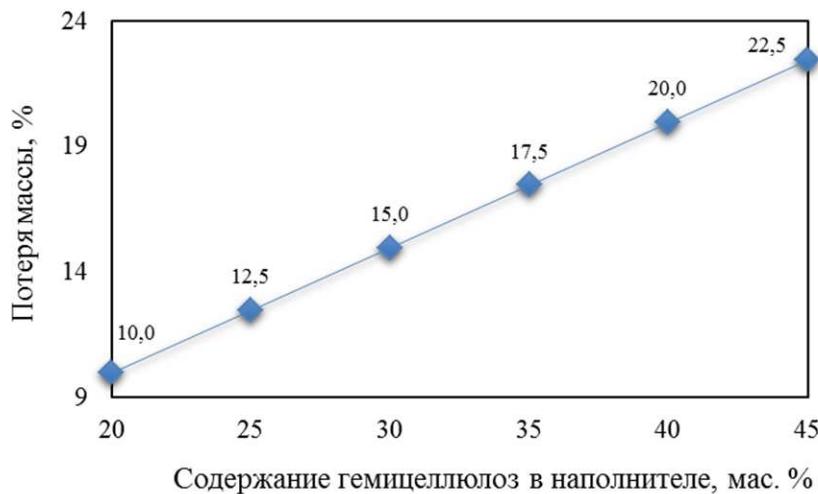
**Фото 1.** Микрофотографии образцов композитов с полимерной фазой вторичного поливинилхлорида и 50 мас. % измельчённой шелухи овса при увеличении 100×: *а* — до выдержки в активированном грунте; *б* — после 120 суток выдержки

**Photo 1.** Micrographs of composites samples with a polymer phase of recycled polyvinyl chloride and 50 wt. % crushed oat husk at 100× magnification: (**a**) before seasoning in activated soil; (**b**) after 120 days of seasoning



**Рисунок 3.** Зависимость показателя потери массы после выдержки в активированном грунте в течение 120 суток образцов композитов с полимерной фазой первичного поливинилхлорида от содержания в наполнителе лигнина и гемицеллюлоз при содержании целлюлозы 30 мас. %

**Figure 3.** Dependence of the weight loss index after seasoning in activated soil for 120 days of composites samples with a polymer phase of primary polyvinyl chloride on the content of lignin and hemicelluloses in the filler at a constant cellulose content of 30 wt. %



**Рисунок 4.** Зависимость показателя потери массы после выдержки в активированном грунте в течение 120 суток образцов композитов с полимерной фазой вторичного поливинилхлорида от содержания гемицеллюлоз в наполнителе

**Figure 4.** Dependence of the weight loss index after seasoning in activated soil for 120 days of composites samples with a polymer phase of recycled polyvinyl chloride on the content of hemicelluloses in the filler

#### 4. Обсуждение и заключение

Известно, что по сравнению с полиолефинами поливинилхлорид является значительно менее стойким полимером. Он более подвержен термической, окислительной, фото- и биодеструкции. Иллюстрацией последнего утверждения может являться сравнение показателей потери массы после выдержки в активированном грунте в течение 120 суток полиэтилена высокой плотности, первичного поливинилхлорида (см. опыт № 1, рисунок 1) и вторичного поливинилхлорида (см. опыт № 8, рисунок 2), которые соответственно составляют 0,1, 0,6 и 2,0 мас. %.

Пластификация первичного поливинилхлорида с помощью дибутилфталата при массовом соотношении полимер:пластификатор 100:11 (см. опыт № 2, рисунок 1) позволяет увеличить показатель потери массы за 120 суток выдержки более чем в три раза.

Для поливинилхлорида также, как и для полиолефинов, характерен резкий рост показателя потери массы после выдержки в активном грунте, связанный с введением лигноцеллюлозного наполнителя. Наибольшая степень биоразложения в активированном грунте характерна для композитов с наполнителями недревесного происхождения — шелухой овса и измельчённым сеном луговых трав; потеря массы образцами при выдержке в течение 120 суток с этими наполнителями составляет соответственно 10,1 и 14,5 мас. %.

Причинами высокой степени биоразложения данных материалов являются очень высокое содержание гемицеллюлоз (более 40 мас. % в шелухе пшеницы), относительно высокое содержание целлюлозы и относительно низкое содержание лигнина (14,3 мас. % в сене луговых трав). Примечательно, что композиционный материал с полимерной фазой поливинилхлорида и измельчённой фитомассой опавших листьев характеризуется значительно меньшими значениями показателя потери массы, что вызвано, по-видимому, более высоким содержанием лигнина в наполнителе (35,2 мас. %).

Высокие темпы разложения образцов ПКМ с наполнителями недревесного происхождения подтверждаются микрофотографиями их поверхностей до и после выдержки в активированном грунте (см. фото 1). Наименьшую потерю массы после выдержки в активном грунте демонстрируют образцы композитов с наполнителями древесного происхождения — древесной мукой марки 180 (см. опыт № 2, рисунок 1) и опилками бука (см. опыт № 3, рисунок 1).

Для композиционных материалов с полимерной фазой вторичного ПВХ в целом характерны сходные тенденции. Однако вследствие использования в качестве полимерной матрицы предварительно подвергавшегося эксплуатации поливинилхлорида, процессы старения и деструкции композитов идут значительно легче и быстрее. Так, показатель потери массы после 120 суток выдержки для композита с полимерной фазой вторичного ПВХ и 50 мас. % измельчённого сена луговых трав достигает 24,6 мас. %, что является абсолютным максимумом среди всех рассмотренных в работе композитов.

Применение вторичного поливинилхлорида в качестве полимерной фазы для получения биоразлагаемых полимерных композиционных материалов представляется перспективным способом утилизации отходов поливинилхлорида. Применение лигноцеллюлозных наполнителей недревесного происхождения с высоким содержанием целлюлозы и гемицеллюлоз позволяет значительно ускорить процесс биодеструкции таких композитов. В то же время целесообразной представляется оценка фитотоксичности продуктов разложения композитов с полимерной фазой вторичного ПВХ и лигноцеллюлозными наполнителями.

Чтобы установить закономерности влияния химического состава лигноцеллюлозных наполнителей на физико-механические свойства композитов с полимерными фазами ПВХ, была получена серия образцов с наполнителями растительного происхождения, различающимися по содержанию лигнина, целлюлозы, гемицеллюлоз и минеральных веществ (древесная мука, опилки бука, шелуха овса, фитомасса опавших листьев, сено естественных сенокосов).

Установлено, что содержание минеральных веществ в наполнителе не оказывает значимого влияния на показатель потери массы после выдержки в активированном грунте в течение 120 суток. В то же время увеличение содержания целлюлозы и лигнина негативно сказывается на способности материала к биоразложению (см. рисунок 3). В случае лигнина найденная закономерность является подтверждением его известных бактерицидных свойств

[9]. В случае целлюлозы эта зависимость противоречит ранее найденной зависимости для композитов с полимерной фазой ПВХ и наполнителями, полученными смешением крафт-лигнина и микроцеллюлозы [10]. Очевидно, что в биоразложение композитов с полимерной фазой ПВХ наибольший вклад вносит содержание гемицеллюлоз. При этом вклад гемицеллюлоз в биодеградацию композитов с лигноцеллюлозными наполнителями более значителен по сравнению с лигнином и целлюлозой. Поэтому увеличение содержания целлюлозы в наполнителе, означающее снижение содержания гемицеллюлоз, приводит к падению показателя потери массы после выдержки в грунте. При использовании вторичного поливинилхлорида в качестве полимерной фазы композитов с лигноцеллюлозными наполнителями содержание гемицеллюлоз становится единственным фактором, оказывающим статистически значимое влияние на показатель биоразложения после 120 суток выдержки в активированном грунте (см. рисунок 4).

Высоким содержанием гемицеллюлоз объясняется высокая степень биодеградации композитов с наполнителями недревесного происхождения, в частности, мукой шелухи овса и измельчённым сеном луговых трав. Относительно низкую степень биоразложения композита с фитомассой опавших листьев можно объяснить высоким содержанием лигнина в наполнителе.

Нахождение закономерностей влияния компонентного состава лигноцеллюлозных наполнителей на физико-механические свойства композитов является теоретической базой для выбора наполнителя для разработки методики регулирования степени биоразложения, обусловленного конкретной областью применения композита. Получение изделий из композитов с полимерной фазой вторичного ПВХ и лигноцеллюлозными наполнителями представляется важным шагом к решению проблемы утилизации отходов лесопромышленного и аграрного комплексов, а также пластиковых отходов производства и потребления.

## Список литературы

1. Review. Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites / A. Vihod, M. R. Sanjay, S. Suchart, P. Jyotishkumar // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 258. P. 1—27. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120978.
2. A literature review on life cycle tools fostering holistic sustainability assessment: An application in biocomposite materials / L. J. Rodriguez, P. Peças, H. Carvalho, C. E. Orrego // Journal of Environmental Management. 2020. 262. 110308. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110308.
3. Feng J., Li S., Peng R. Effects of fungal decay on properties of mechanical, chemical, and water absorption of wood plastic composites // Journal Appl. Polym. Sci. 2020. e50022. DOI: 10.1002/app.50022.
4. Matlin S. A., Mehta G., Hopf H. Material circularity and the role of the chemical sciences as a key enabler of a sustainable post-trash age // Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2020. Vol. 7. 100312. DOI: 10.1016/j.scp.2020.100312.

5. Braghieri F. L., Passarini L. Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities // Current Forestry Reports. 2020. Vol. 6. P. 172—183. DOI: 10.1007/s40725-020-00112-9.
6. Tajeddin B., Momen R. F. The effect of wheat straw bleaching on some mechanical properties of wheat straw/LDPE biocomposites // Journal of Food and Bioprocess Engineering. 2020. Vol. 3, no. 1. P. 23—28. DOI: 10.22059/JFABE.2020.75620.
7. Салмерс Д. Поливинилхлорид. СПб.: Профессия, 2007. 736 с.
8. Химия растительного сырья: учебное пособие / А. В. Вураско, А. Р. Минакова, А. К. Жвирблите, И. А. Блинова. Екатеринбург: УГЛТУ, 2013. 90 с.
9. Lignin-based materials with antioxidant and antimicrobial properties / F. Lazi, W. Yang, P. Ma [et al.] // Elsevier. 2021. P. 291—326. DOI: 10.1016/B978-0-12-820303-3.00003-5.
10. Effect of microcrystalline cellulose content in mixture with kraft lignin on properties of wood-polymer composites / P. S. Zakharov, A. E. Shkuro, V. V. Glukhikh, Y. M. Kulazhenko // AIP Conference Proceedings. 2022. 2632. DOI: 020004. 10.1063/5.0098919.

## References

1. Vihod A., Sanjay M. R., Suchart S., Jyotishkumar P. Review. Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 258, pp. 1—27. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120978.
2. Rodriguez L. J., Peças P., Carvalho H., Orrego C. E. A literature review on life cycle tools fostering holistic sustainability assessment: An application in biocomposite materials. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262, 110308. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110308.
3. Feng J., Li S., Peng R. Effects of fungal decay on properties of mechanical, chemical, and water absorption of wood plastic composites. *Journal Appl. Polym. Sci.*, 2020, e50022. doi: 10.1002/app.50022.
4. Matlin S. A., Mehta G., Hopf H. Material circularity and the role of the chemical sciences as a key enabler of a sustainable post-trash age. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2020, vol. 7, 100312. doi: 10.1016/j.scp.2020.100312.
5. Braghieri F. L., Passarini L. Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities. *Current Forestry Reports*, 2020, vol. 6, pp. 172—183. doi: 10.1007/s40725-020-00112-9.
6. Tajeddin B., Momen R. F. The effect of wheat straw bleaching on some mechanical properties of wheat straw/LDPE biocomposites. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 23—28. doi: 10.22059/JFABE.2020.75620.
7. Salmers D. *Polyvinylchloride*. Saint Petersburg, Profession, 2007. 736 p. (In Russ.)
8. Vurasko A. V., Minakova A. R., Zhvirblyte A. K., Blinova I. A. *Chemistry of plant raw materials: a textbook*. Ekaterinburg, UGLTU, 2013. 90 p. (In Russ.)
9. Lazi F., Yang W., Ma P., Torre L., Puglia D. Lignin-based materials with antioxidant and antimicrobial properties. *Elsevier*, 2021, pp. 291—326. doi: 10.1016/B978-0-12-820303-3.00003-5.
10. Zakharov P. S., Shkuro A. E., Glukhikh V. V., Kulazhenko Y. M. Effect of microcrystalline cellulose content in mixture with kraft lignin on properties of wood-polymer composites. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2632. doi: 020004. 10.1063/5.0098919.

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6943

УДК 674.81

*Статья*

# **Геотехническое обоснование работоспособности трелёвочных волоков и технологических коридоров на склонах оттаивающих почвогрунтов при работе лесных машин с колёсным и полугусеничным движителем**

**Каляшов Виталий Анатольевич**

*кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), vit832@yandex.ru*

**Шапиро Владимир Яковлевич**

*доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), shapiro54vlad@mail.ru*

**Григорьев Игорь Владиславович**

*доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inboxl.ru*

**Куницкая Ольга Анатольевна**

*доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), ola.ola07@mail.ru*

**Дмитриев Александр Сергеевич**

*инженер авторского надзора, АО «Гипростроймост-Санкт-Петербург» (Российская Федерация), dmitriev.nauka@mail.ru*

**Григорьева Ольга Ивановна**

*кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva\_o@list.ru*

*Получена: 20 марта 2023 / Принята: 29 августа 2023 / Опубликована: 1 сентября 2023*

---

**Аннотация:** В Российской Федерации значительная часть территории лесного фонда расположена на вечной мерзлоте. Многие регионы России обладают

большими запасами спелых и перестойных эксплуатационных лесов, причём значительная часть этих запасов расположена в труднодоступных местах, не только по отношению к развитости дорожной сети, но и по рельефу местности. В настоящее время подавляющий объём заготовок древесины в России производится при помощи современных машинных комплексов, в основном включающих колёсные лесные машины различной компоновки и назначения. При этом проблема негативного воздействия колёсных лесных машин и трелёвочных систем на их базе не просто остаётся актуальной, а приобретает ещё большую остроту, поскольку экосистемы горных лесов, лесов на склонах сопок и т. д. относятся к наиболее ранимым, подверженным водной и ветровой эрозии. Для снижения негативного воздействия движителей лесных машин на почвогрунты достаточно часто используют машины на полугусеничном ходу, которые, благодаря существенно большему пятну контакта с поверхностью движения и большей силе тяги, в сложных условиях показывают лучшие эксплуатационные характеристики. В статье показано, что каждый склон со своими геометрическими параметрами и фактическими данными о мощности оттаивающего слоя почвогрунта, границе зоны мерзлоты и физико-механическими свойствами почвогрунта является уникальным геотехническим объектом. Многообразие параметров движения лесных машин (трелёвки) при прогнозах глубины колеи обуславливает необходимость классификация склонов по технологическим свойствам почвогрунтов и критерию работоспособности трелёвочных волоков (технологических коридоров). Разработка такой классификации должна базироваться на актуальных гидрогеологических и геомеханических данных о состоянии почвогрунтов, слагающих массив склона. Представленные исследования расширяют мнения о технологических требованиях обеспечения работоспособности трелёвочных волоков (технологических коридоров) на склонах оттаивающих почвогрунтов, что способствует более эффективному использованию лесозаготовительной техники в сложных сезонно-климатических условиях.

**Ключевые слова:** леса на склонах; лесосечные работы; трелёвка; почвогрунты; леса на вечной мерзлоте

---

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6943

*Article*

## **Geotechnical substantiation of the operability of skidding drags and technological corridors on the slopes of thawing soils during the operation of forest machines with wheeled and semi-tracked propulsion**

**Vitalij Kalyashov**

*Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), vit832@yandex.ru*

**Vladimir Shapiro**

*D. Sc. in engineering, professor, Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), shapiro54vlad@mail.ru*

**Igor Grigorev**

*D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), silver73@inboxl.ru*

**Ol'ga Kunickaya**

*D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), ola.ola07@mail.ru*

**Alexander Dmitriev**

*resident engineer, JSC «Giprostroymost-Saint Petersburg» (Russian Federation), dmitriev.nauka@mail.ru*

**Olga Grigoreva**

*Ph. D. in agriculture, associate professor, Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva\_o@list.ru*

*Received: 20 March 2023 / Accepted: 29 August 2023 / Published: 1 September 2023*

---

**Abstract:** In the Russian Federation a significant part of the forest fund is located on permafrost. Many regions of Russia have large reserves of ripe and over-mature operational forests, and a significant part of these reserves is located in hard-to-reach places. Currently, the overwhelming volume of wood harvesting in Russia is performed by using modern machine complexes mainly including wheeled forestry machines of various configuration and purposes. At the same time the problem of the negative

impact of wheeled forest machines and skidding systems based on them becomes even more acute since the ecosystems of mountain forests and forests on the slopes of hills are among the most vulnerable ones due to water and wind erosion. To reduce the negative impact of forest machinery propellers on soils semi-tracked vehicles are often used because of their significantly larger contact surface and a greater traction force in difficult conditions. The article shows that each slope as a unique geotechnical object that features its own geometric parameters and actual data including the capacity of the thawing soil bearing surface and permafrost zone edge should be classified taking into account the variety of skidder movement parameters, the technological properties of soils and the criterion of the extraction road operability. The development of such a classification should be based on up-to-date hydrogeological and geomechanical data on the state of the soils composing the slope area. The presented studies expand the understanding of the technological requirements for ensuring the extraction road operability on the slopes with thawing soils, thus contributing to more efficient use of logging technology in difficult seasonal and climatic conditions.

**Keywords:** forests on slopes; logging operations; skidding; soils; forests on permafrost

---

## 1. Введение

Условия эксплуатации различных участков леса характеризуются многообразием параметров технического, технологического и геомеханического состояний. В пределах одной лесосеки можно выделить ряд участков, почвогрунты которых будут существенно отличаться, в частности, по технологическим свойствам — устойчивости, прочности и несущей способности, которые, наряду с другими факторами, зависят от сезонности осуществления трелёвочных работ [1—5].

Работоспособность трелёвочного волока (технологического коридора) означает возможность эффективной эксплуатации лесной машины или трелёвочной системы в заданном режиме, что выдвигает требование соответствия технологических параметров трелёвки (веса груза, давления в шинах, уровня маневренности и др.) прочностным характеристикам почвогрунта [6—8]. В этом контексте следует рассматривать и вопросы определения оптимальной глубины  $h_k$  образованной колеи.

Из различных характеристик прочности почвогрунтов можно особо отметить такое их свойство, как несущая способность  $Ps$  (кПа), которая нашла ограниченное применение при изучении процессов статической нагрузки на почвогрунт лесных машин и трелёвочных систем [9—12]. Областью основного использования этого показателя являются фундаменты крупных оснований.

При ограниченных (в пределах пятна контакта) размерах взаимодействия колёсной пары или гусеницы лесной машины с краевой частью массива почвогрунта необходимо учитывать вероятностный характер показателя несущей способности  $Ps$  в силу неполной информации об исходных факторах, влияющих на прочность среды [13].

Рассматривая процесс взаимодействия лесной машины или трелёвочной системы на её базе с краевой частью массива почвогрунта, следует отметить, что наиболее информативным показателем сопротивления почвогрунта статическим разрушающим нагрузкам является прочность на одноосное сжатие  $Rc$  (кПа).

Обоснование этого вывода вытекает из того обстоятельства, что величина  $Rc$  отражает как способность почвогрунта сопротивляться вертикальным сжимающим нагрузкам, так и то, что само определение этой величины происходит при неограниченном боковом расширении, вплоть до момента предельного сопротивления сдвига. Для условий действия статической нагрузки на склонах, когда трелёвочный волок (технологический коридор) расположен на наклонной плоскости, учёт механизма сдвига почвогрунта представляется важным.

Отметим, что показатель  $Rc$  характеризует прочность при одноосном сжатии также в процессе развития деформаций сдвига не только при разрушении почвогрунтов, но и других сплошных сред, в частности массива коры [4].

## 2. Материалы и методы

Из анализа огибающей кругов Мора в рамках обоснования паспорта прочности Кулона для определения величины  $R_c$  в работе [15] получено соотношение

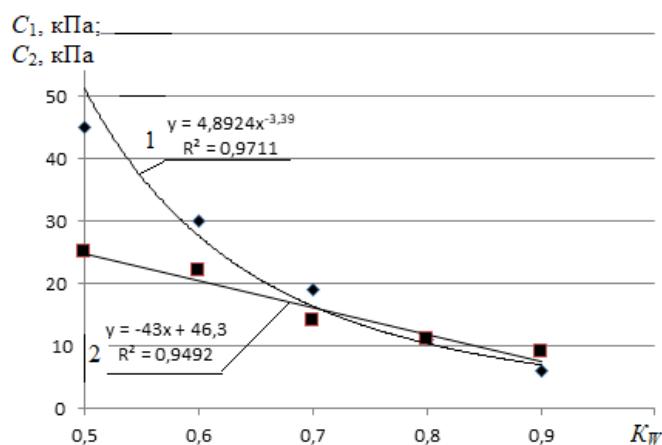
$$R_c = \frac{2C\cos\varphi}{1-\sin\varphi}, \quad (1)$$

где  $C$  — величина сцепления грунта, кПа,  $\varphi$  — угол внутреннего трения,  $^{\circ}$ .

Использование показателя прочности  $R_c$ , зависящего от двух характеристик  $C$  и  $\varphi$ , имеет особую значимость для оценки работоспособности трелёвочного волока (технологического коридора) на склонах оттаивающих почвогрунтов, поскольку близкое расположение водонепроницаемой границы вечной мерзлоты и обусловленный ею резкий рост влажности ( $W, \%$ ) почвогрунта снижают показатели его прочности [16].

Так, на верхних участках склона влажность  $W$  почвогрунта минимальная и стремится к нижнему пределу пластичности ( $W_p$ ) или величине на границе раскатывания, тогда как максимальная влажность наблюдается на нижних участках, у основания склона и стремится к верхнему пределу пластичности или величине на границе текучести ( $W_T$ ). Введём для дальнейшего анализа безразмерный показатель влажности почвогрунта в виде коэффициента  $K_W = \frac{W}{W_p}$ .

Обработка опытных данных [16] для двух видов оттаивающих грунтов: 1 — суглинка и 2 — песка пылеватого в диапазоне изменения  $K_W$  от 0,5 до 0,9 при показателе  $W_T = 40 \%$  позволила получить (рисунок 1) графические зависимости величин сцепления соответственно  $C_1$ , кПа (линия 1 — суглинок) и  $C_2$ , кПа (линия 2 — песок) от коэффициента  $K_W$ .

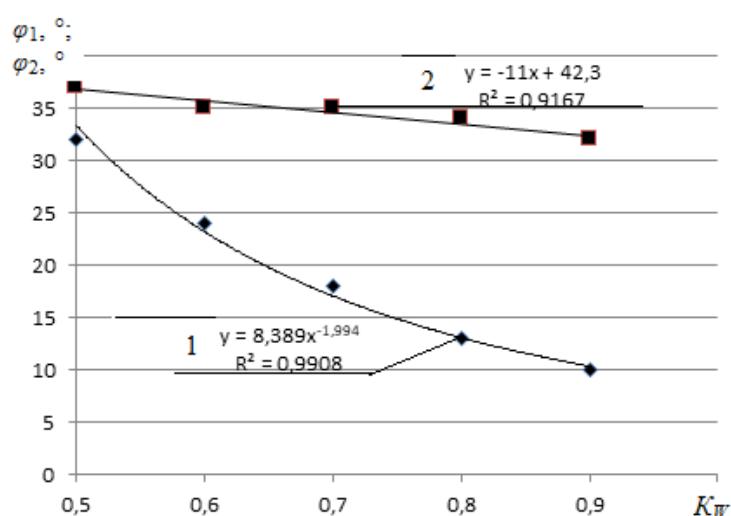


**Рисунок 1.** Зависимости величин сцепления грунтов от относительной влажности:  
1 —  $C_1$ , кПа; 2 —  $C_2$ , кПа

**Figure 1.** Dependences of soil adhesion values on relative humidity: 1 —  $C_1$ , kPa;  
2 —  $C_2$ , kPa

Из данных рисунка 1 следует, что характер снижения величины  $C$  суглинка с ростом влажности грунта существенно отличается от аналогичной зависимости для песка и это отличие тем значительнее, чем ниже показатель  $W$ . При  $K_W \geq 0,7$  ( $W \geq 28\%$ ) рост влажности приводит к соответствующему снижению величины сцепления для обоих грунтов как в качественном, так и количественном отношениях.

Абсолютно иные результаты (рисунок 2) получены при аналогичном исследовании поведения углов внутреннего трения  $\varphi_1$ , ° (линия 1 — суглинок) и  $\varphi_2$ , ° (линия 2 — песок) с ростом относительной влажности  $K_W$  (ось абсцисс).



**Рисунок 2.** Зависимость углов внутреннего трения грунтов от относительной влажности

**Figure 2.** Dependence of soil internal friction angles on relative humidity

Кратное (более чем в 3 раза) снижение угла  $\varphi_1$  для суглинка при увеличении влажности  $W$  с 20 до 36 % оказывает существенное влияние на уменьшение прочности грунта, в то время как для песка линейное снижение  $\varphi_2$  в этом диапазоне изменения  $W$  не превосходит 15—16 %.

Допустим, что трелёвочный волок (технологический коридор) расположен на склоне протяжённостью  $L_c = 50$  м с углом наклона  $\alpha$  к линии горизонта и массив содержит участок оттаивающего почвогрунта высотой  $H_{OT}$ .

Пусть лесная машина удалена на расстояние  $L$  от основания склона и величина  $K_L = L/L_c$ , % будет характеризовать меру относительного удаления контакта взаимодействия. Тогда безразмерный параметр  $K_W$  связан с параметрами склона соотношением [17]

$$K_W = 0,9 - 0,4 \frac{L_{\text{им}}}{H_{OT}}. \quad (2)$$

Зависимость (2) позволяет в ходе дальнейшего исследования через коэффициент  $K_W$  учесть влияние параметров склона  $L$ ,  $\alpha$  и  $H_{OT}$  на показатели прочности почвогрунтов.

Детальный анализ проблем прочности почвогрунтов, особенно повышенной влажности, требует учёта такого явления, как дилатансия [8].

Принимая во внимание, что давление на почвогрунт происходит в ограниченном объёме, дилатансия будет способствовать росту в нём средних напряжений, что, в свою очередь, приводит к увеличению сопротивления сдвигу и повышению несущей способности почвогрунта.

Определение угла дилатансии  $\psi$ , на который увеличивается суммарный угол внутреннего трения  $\varphi$ , особых проблем при инструментальных исследованиях не вызывает. Основными методами являются однополостной срез, перекашивание, трёхосное сжатие и кручение.

Для определения угла  $\psi$  в работе [18] предложена формула

$$\sin\psi = \frac{\sin\varphi - \sin\varphi_{kp}}{1 - \sin\varphi\sin\varphi_{kp}}, \quad (3)$$

где  $\sin\varphi_{kp}$  — это синус такого значения угла внутреннего трения  $\varphi = \varphi_{kp}$ , который соответствует остаточному значению сопротивления сдвигу и возникновению плоскости потенциала пластичности.

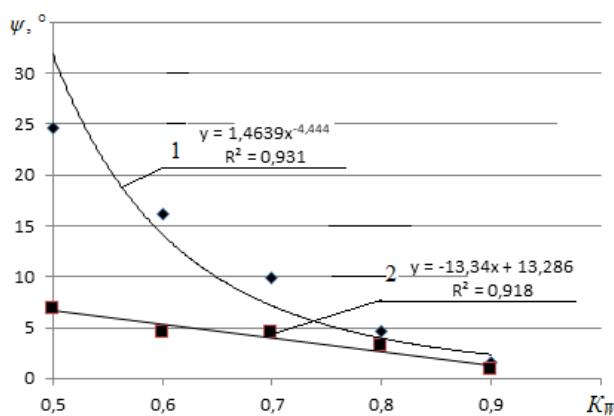
Оценим критическое значение угла  $\varphi$  с помощью полученных на рисунке 1 корреляционных зависимостей  $\varphi(K_W)$  при  $K_W = 1$ , т. е. при достижении влажности  $W$  значения предела пластичности  $W_T$ . Таким образом, для суглинка принимаем  $\varphi_{1,kp} = 8,4^\circ$ , для песка —  $\varphi_{2,kp} = 31,3^\circ$ . Как видим, для песка полученный критический показатель угла внутреннего трения в 3,7 раза больше, чем для суглинка.

Эффект дилатансии используют при строительстве сооружений и определении прочности фундаментов сооружений.

Оценим с использованием математических моделей механики разрушения грунтов с внутренним трением [19], [20], насколько этот эффект является значимым при определении прочности почвогрунта и работоспособности трёхвального волока (технологического коридора) на склоне оттаивающего почвогрунта при возможном маневрировании лесной машины.

На рисунке 3 по оси ординат отложены значения углов дилатансии  $\psi$ ,  $^\circ$  для суглинка (линия 1) и песка (линия 2), по оси абсцисс — коэффициент  $K_W$ .

Сравним данные рисунков 2 и 3. Диапазон изменения угла  $\psi_2$  для песка весьма узкий и не выходит за пределы  $7^\circ$ , тогда как зависимость  $\psi_1 (K_W)$  для суглинка подчиняется степенному закону с высоким отрицательным показателем степени, превышающим уровень, равный  $-4,0$ . При этом для суглинков в сухом состоянии ( $K_W < 0,6$ ) наблюдаются весьма существенные значения угла дилатансии  $\psi_1 > 15^\circ$ .



**Рисунок 3.** Зависимость углов дилатансии  $\psi_1$  и  $\psi_2$  от коэффициента  $K_W$ : 1 —  $\psi_1$ ; 2 —  $\psi_2$

**Figure 3.** Dependence of the dilatancy angles  $\psi_1$  and  $\psi_2$  on the coefficient  $K_W$ : 1 —  $\psi_1$ ; 2 —  $\psi_2$

### 3. Результаты

Исследуем влияние угла дилатансии на изменение показателя прочности почвогрунта на одноосное сжатие  $R_c$ . Результаты представлены на рисунке 4: а) для суглинка — зависимости  $R_c(K_W)$  при учёте только угла внутреннего трения  $\varphi^\circ$  (линия 1) и то же самое, но с учётом угла дилатансии  $\psi^\circ$  (линия 2); б) аналогичные зависимости для песка. Ощутимый (кратный в 2—3 раза) вклад угла дилатансии на повышение прочности грунта имеет место для сухих суглинков, тогда как для влажного состояния грунта можно ограничиться только каноническими значениями угла внутреннего трения  $\varphi^\circ$ . Для песков влиянием угла дилатансии на величину  $R_c$  можно пренебречь даже для сухого состояния грунта (относительная погрешность составляет 8—12 %). Таким образом, для грунтов, обладающих свойством существенного снижения угла внутреннего трения  $\varphi^\circ$  с ростом влажности  $W$ , при значениях  $W \leq 25\%$  учёт угла дилатансии  $\psi^\circ$  при оценке прочности оттаивающего почвогрунта представляется обоснованным и необходимым. В том случае, если наблюдается незначительное влияние показателя влажности  $W$  на изменение угла  $\varphi^\circ$ , эффектом упрочнения почвогрунта за счёт дилатансии можно пренебречь.

Перейдём к оценке работоспособности трелёвочного волока (технологического коридора) по критерию глубины образованной колеи, нормативные значения которой не должны выходить за пределы  $h_k = 0,1$  м.

Для определения глубины ( $h_k, \text{м}$ ) образованной колеи воспользуемся соотношениями, установленными в работе [19], которые учитывают следующие параметры:

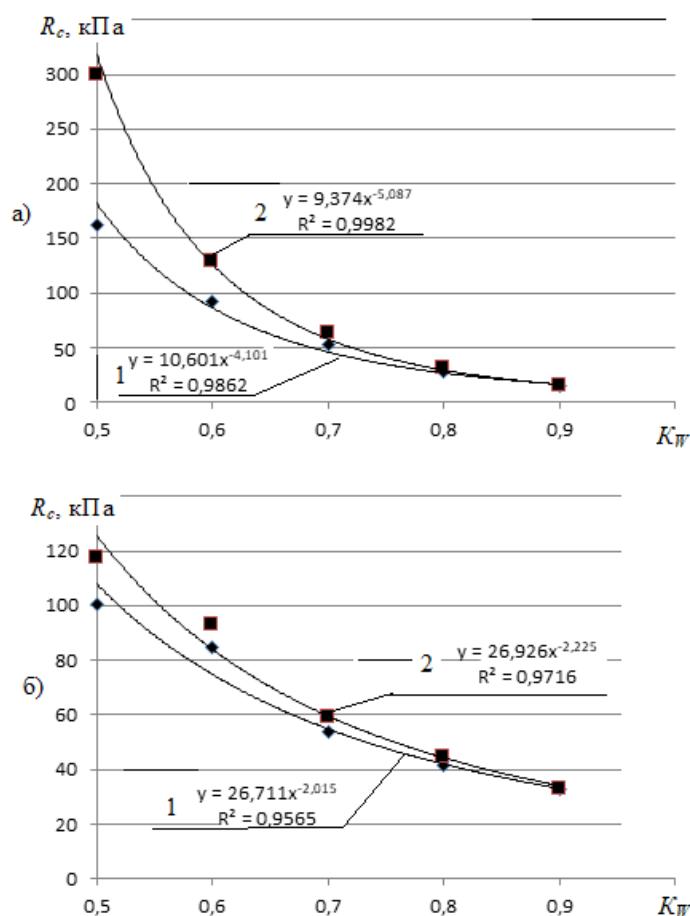
- технические характеристики трелёвки: вес груза  $Q$ , давление на почвогрунт  $\sigma_0$ , радиус колеса  $R$  и поворот движителя на угол  $\theta$ ;

- физико-механические свойства почвогрунта: величину предельных напряжений сдвига  $\tau$  из паспорта его прочности, модуль общей деформации  $E$ , коэффициенты Пуассона  $\nu$  и бокового распора  $\gamma = \nu/(1-\nu)$ .

В итоге расчёт  $h_k$  производим с помощью системы формул:

$$h_k = a \left\{ \sigma_o \frac{(1-\gamma)(1+\sin 2\phi)}{2\tau} \right\}^{1/n}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{3Q \cos \alpha (1-\nu^2) R}{4E}}, \quad \tau = C + \sigma_o \operatorname{tg} \phi, \quad (4)$$

где  $a$  — радиус контактной площадки,  $n = k - \frac{\gamma}{2}$  — коэффициент затухания напряжений в среде с внутренним трением [20], зависящий от формы штампа. Для штампа сферической формы  $k = 3$ , цилиндрической — 2, для плоского штампа — 1.



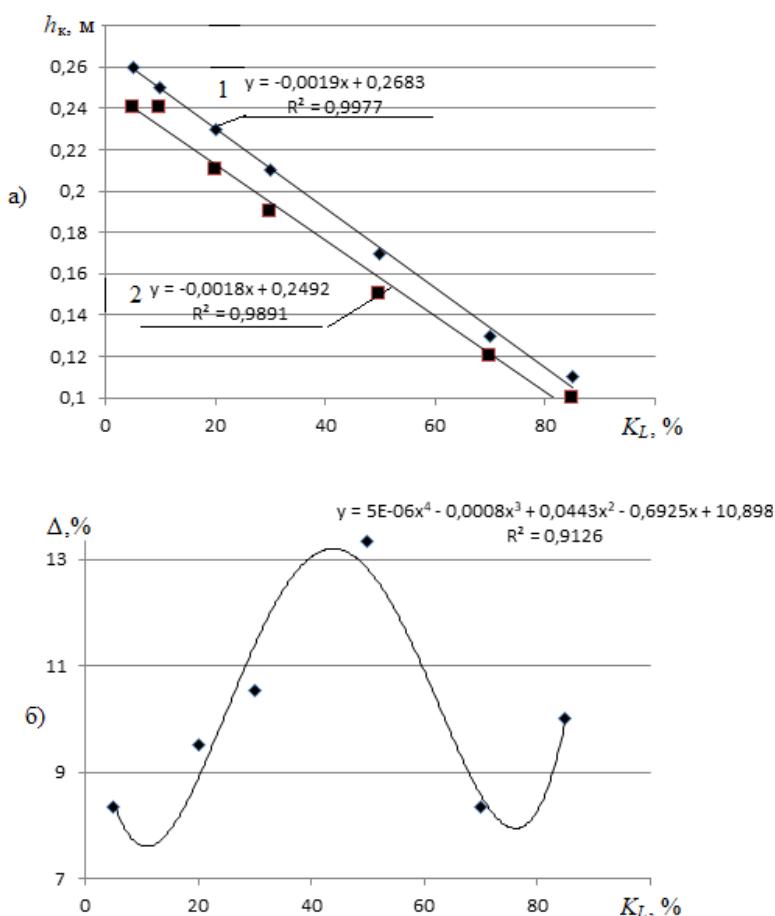
**Рисунок 4.** Влияние угла дилатансии на показатели прочности грунтов на одноосное сжатие: а — суглинок, б — песок; 1 —  $R_c(K_w)$  при учёте только угла внутреннего трения  $\varphi$ , 2 —  $R_c(K_w)$  с учётом угла дилатансии  $\psi$

**Figure 4.** The dilatancy angle effect on the soil strength at uniaxial compression: (a) loam, (b) sand; 1 —  $R_c(K_w)$  taking into account only the angle of internal friction  $\varphi$ , 2 —  $R_c(K_w)$  taking into account the angle of dilatancy  $\psi$

Исходные параметры:  $R = 0,63$  м,  $Q = 19$  т,  $\sigma_o = 56$  кПа,  $k = 2$ ,  $\nu = 0,26$ ,  $\gamma = 0,27$ ,  $E = 1$  МПа,  $W_T = 40\%$ ,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $L_c = 50$  м,  $K_L = 0,5$  ( $L = 25$  м),  $H_{OT} = 10$  м,  $K_W = 0,64$  ( $W = 25,6\%$ ). Для таких условий установлены характеристики паспорта прочности почвогрунтов:  $C_1 = 22,21$  кПа,  $\varphi_1 = 20,43^\circ$ ;  $C_2 = 17,05$  кПа,  $\varphi_2 = 35,26^\circ$ ;  $\psi_1 = 12,36^\circ$ ,  $\psi_2 = 4,73^\circ$ . В итоге получены следующие расчётные значения глубины колеи:

- для суглинка: без учёта дилатансии  $h_{k1}^{\Psi} = 0,17$  м, с учётом дилатансии и увеличения прочности грунта  $h_{k1}^{\Psi} = 0,15$  м (отличие  $\Delta_1$  более 13 %);
- для песка: без учёта дилатансии  $h_{k2}^{\Psi} = 0,15$  м, с учётом дилатансии и увеличения прочности грунта  $h_{k2}^{\Psi} = 0,14$  м (отличие  $\Delta_2$  около 7 %).

На рисунке 5а для суглинка представлены зависимости изменения глубины колеи  $h_k$ , м по мере удаления  $K_L$ , % лесной машины от основания склона: линия 1 — без учёта дилатансии, линия 2 — с учётом этого эффекта, на рисунке 5б — график функции зависимости погрешности  $\Delta$ , % от  $K_L$ , %.



**Рисунок 5.** Снижение  $h_k$  по мере удаления лесной машины от основания склона: линия 1 — без учёта дилатансии, линия 2 – с учётом дилатансии

**Figure 5.** Decrease in  $h_k$  as the forest machine moves away from the slope base: line 1 — without taking into account dilatancy, line 2 — taking into account dilatancy

Как видим, функция  $\Delta(K_L)$  имеет выраженный экстремум в срединной части склона ( $K_L = 0,35\text{--}0,55$ ), т. е. при таком местоположении лесной машины (трелёвочной системы) учёт дилатансии представляется наиболее существенным и увеличение прочности почвогрунта приводит к 12—13 %-му снижению глубины колеи.

У основания склона (при максимальной влажности  $W$  почвогрунта) и на его вершине (влажность  $W$  почвогрунта минимальна) угол дилатансии  $\psi$  в дополнении к углу внутреннего трения  $\varphi$  уточняет прогнозную величину  $h_k$  на 8—9 % в направлении её снижения.

Максимальные значения глубины колеи  $h_k$  наблюдаются при следующих условиях: давление на почвогрунт  $\sigma_o$  достигает 50—80 кПа,  $K_L$  не более 0,1 (10 %), мощность слоя оттаивающего почвогрунта  $H_{OT} > 20$  м, модуль общей деформации  $E < 700$  кПа, угол наклона  $\alpha$  не более  $10^\circ$  (поверхность склона близка к границе с зоной мерзлоты). Отмеченные условия работы лесной машины или трелёвочной системы на её базе будем считать экстремальными.

В этом случае влажность  $W$  превышает 35 % и значения  $h_k \rightarrow 0,30\text{--}0,35$  м, что значительно (в 2—3 раза) превышает верхнюю границу диапазона нормативных значений  $h_k = 0,10\text{--}0,15$  м, когда лесная машина или трелёвочная система функционирует наиболее эффективно, а трелёвочный волок (технологический коридор) можно считать работоспособным. Как показали расчёты, снижение давления в шинах до  $\sigma_o = 27$  кПа в экстремальных условиях обеспечивает существенное (на 40—50 %) уменьшение  $h_k$  до уровня 0,23—0,25 м, но считать трелёвочный волок (технологический коридор) работоспособным не представляется возможным.

В этом случае целесообразно от колёсных лесных машин и форвардеров (ЛМ-К) переходить к использованию техники с полугусеничным ходом (ЛМ-ПГХ), в частности, МТЗ-80, МТЗ-82 — величину давления на почвогрунт можно снизить в 2,5—8 раз (до 8—10 кПа), а грузоподъёмность можно увеличить вдвое [21].

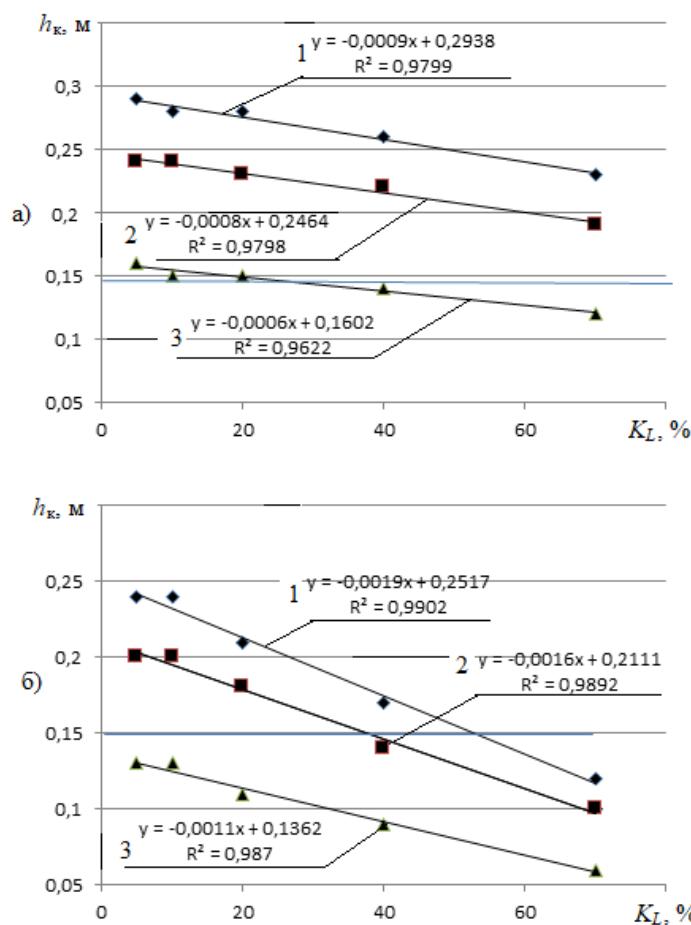
Рассмотрим два склона одинаковой протяжённости  $L_c = 50$  м с отличающимися следующими параметрами: склон 1:  $H_{OT} = 20$  м,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $E = 1000$  кПа и склон 2:  $H_{OT} = 10$  м,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $E = 700$  кПа.

В таблице 1 для обоих склонов приведены данные  $h_k$ , м (в числителе — для склона 1, в знаменателе — для склона 2), позволяющие выполнить сравнительный анализ работоспособности трелёвочных волоков (технологических коридоров) по критерию глубины колеи для двух типов машин — ЛМ-К и ЛМ-ПГХ при изменении их местоположения на поверхности склона ( $K_L = 5\text{--}70$  %).

Как следует из анализа полученных табличных данных, колёсные машины обеспечивают нормативную работоспособность трелёвочного волока (технологического коридора) только на втором склоне в его верхней части ( $K_L > 50$  %). Машины с ПГХ практически полностью соответствуют требованиям работоспособности трелёвочного волока при лесозаготовках на обоих склонах.

**Таблица 1.** Оценка работоспособности трелёвочного волока по глубине колеи**Table 1.** Assessment of the skidding road performance by the depth of the track

$K_L, \%$	$W, \%$	Давление шин или гусениц на грунт $\sigma_o$ , кПа		
		ЛМ-К		ЛМ-ПГХ
		27	56	8
5	35,6/34,8	0,24/0,20	0,29/0,24	0,16/0,13
10	35,2/34,0	0,24/0,20	0,28/0,24	0,15/0,13
20	34,8/32,0	0,23/0,18	0,28/0,21	0,15/0,11
40	33,2/27,6	0,22/0,14	0,26/0,17	0,14/0,09
70	31,2/21,6	0,19/0,10	0,23/0,12	0,12/0,06

**Рисунок 6.** Влияние коэффициента  $K_L$  на глубину колеи  $h_k$ : а — для склона 1, б — для склона 2; 1 —  $\sigma_o = 56$  кПа, 2 —  $\sigma_o = 27$  кПа, 3 —  $\sigma_o = 8$  кПа**Figure 6.** Influence of the  $K^L$  coefficient on the track depth  $h_k$ : (a) for slope 1, (b) for slope 2; 1 —  $\sigma_o = 56$  kPa, 2 —  $\sigma_o = 27$  kPa, 3 —  $\sigma_o = 8$  kPa

Эти выводы наглядно иллюстрируют данные рисунка 6: а) для склона 1 и б) для склона 2, где отражены результаты влияния величины  $K_L$ , % на глубину колеи  $h_k$ , м. Линии 1 и 2 соответствуют значениям давления на почвогрунт  $\sigma_o = 56$  кПа и 27 кПа для колёсных машин, а линия 3 — для машин с ПГХ при давлении на почвогрунт  $\sigma_o = 8$  кПа.

Из анализа рисунка 6 видно, что параметры первого склона полностью исключают возможность применения колёсной техники, тогда как условия движения лесной машины (трелёвки) на втором склоне позволяют её применение в срединной части склона при ограничении давления в шинах величиной 30 кПа. Для машин с ПГХ таких-либо ограничений не существует при работе на обоих склонах и любых их участках.

Обращает на себя внимание линейный характер снижения  $h_k$  по мере роста  $K_L$ , причём угол наклона прямых на рисунке 6б (склон 2), характеризующий скорость (динамику) этого снижения, практически вдвое превышает аналогичный показатель для склона 1.

Следовательно, каждый склон со своими геометрическими параметрами и фактическими данными о мощности оттаивающего слоя почвогрунта, границе зоны мерзлоты и физико-механических свойствах почвогрунта является в определённом смысле уникальным геотехническим объектом.

#### **4. Обсуждение и заключение**

Многообразие параметров движения лесных машин (трелёвки) при прогнозах глубины колеи обуславливает необходимость классификации склонов по технологическим свойствам почвогрунтов и критерию работоспособности трелёвочных волоков (технологических коридоров). Разработка такой классификации должна базироваться на актуальных гидрогеологических и геомеханических данных о состоянии почвогрунтов, слагающих массив склона.

Таким образом, выполненные исследования расширяют представления о технологических требованиях обеспечения работоспособности трелёвочных волоков (технологических коридоров) на склонах оттаивающих почвогрунтов, что способствует более эффективному использованию лесозаготовительной техники в сложных сезонно-климатических условиях.

*Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.*

## Список литературы

1. Распределение проходов по длине волока и расчёт рейсовых нагрузок трелёвочного трактора при движении по грунтам с низкой несущей способностью на примере хлыстовой технологии заготовки леса / М. А. Пискунов, Р. В. Воронов, В. Н. Васильев, А. М. Воронова // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 77. С. 281—291.
2. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А. Моделирование схемы волоков при помощи покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2012. № 2 (123). С. 114—117.
3. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А. Задача размещения волоков и погрузочных пунктов на лесосеке и вопросы применения оптимальных схем на практике // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2009. № 9 (103). С. 58—62.
4. Воронов Р. В., Воронова А. М., Пискунов М. А. Задача покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом и её приложение для оптимального проектирования схем волоков на лесосеках // Информатика и системы управления. 2012. № 1 (31). С. 56—64.
5. Исследование связи конусного индекса и модуля деформации различных типов грунтов / Е. Г. Хитров, А. М. Хахина, В. А. Лухминский, Д. П. Казаков // Resources and Technology. 2017. Т. 14, № 4. С. 1—16.
6. Хитров Е. Г., Фролов И. И. Подбор допустимого давления движителя колёсных лесных машин в зависимости от грунтовых условий // Сборник статей по материалам научно-технической конференции Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2018 года / Отв. ред. В. А. Соколова. СПб., 2019. С. 90—100.
7. Методика расчёта производительности форвардера в зависимости от почвенно-грунтовых условий / Е. В. Котенев, Е. Г. Хитров, Д. А. Ильюшенко, Л. А. Маслобоев // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVII Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Ю. М. Авдеев. Вологда, 2019. С. 196—199.
8. Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines / E. Khitrov, A. Andronov, D. Iliushenko, E. Kotenev // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. Soils; forest ecosystems. Sophia, 2019. С. 649—656.
9. Хитров Е. Г. Анализ составляющих глубины колеи, образующейся под воздействием движителя лесной машины на почвогрунт // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 4. С. 76—93.
10. Хитров Е. Г., Котенев Е. В. Сравнение показателей взаимодействия с грунтом и проходимости колёсных и колёсно-гусеничных движителей // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 4. С. 1—24.
11. Агейкин Я. С. Вездеходные колёсные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
12. Хитров Е. Г., Божбов В. Е., Ильюшенко Д. А. Расчёт несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колёсных движителей // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 122—126.
13. Оценка несущей способности мёрзлого и оттаявшего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелёвочной системой / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 80—86.
14. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Гулько А. Е. Анализ методов расчёта параметров и обоснование математической модели разрушения коры при групповой окорке

древесины // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 8 (121). С. 92—96.

15. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1989. 270 с.
16. Калабина М. В., Царапов М. Н. Прочностные свойства оттаивающих грунтов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием. М., 2017. С. 542—546.
17. Исследование процесса образования колеи и её устойчивость при работе лесных машин и трелёвочных систем на склонах массива оттаивающего грунта / В. А. Каляшов, В. Я. Шapiro, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 2 (42). С. 121—132.
18. Мирный А. Ю. Исследования дилатансии в дисперсных грунтах и методы её количественной оценки // Инженерная геология. 2019. Т. 14, № 2. С. 34—43.
19. Вариационный метод расчёта параметров взаимодействия трелёвочной системы с массивом мёрзлых и оттаивающих грунтов / С. Е. Рудов, В. Я. Шapiro, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 1 (41). С. 68—77.
20. Шapiro В. Я., Григорьев И. В. Деформация и циклическое уплотнение почвогрунта между грунтозацепами крупногабаритных лесных шин // Техника и технология. 2006. № 2. С. 94—100.
21. Добрецов Р. Ю., Дмитриев А. С., Григорьев И. В. Проблемы и перспективы использования в лесном комплексе машин с полугусеничным движителем // Вестник АГАТУ. 2022. № 4 (8). С. 95—105.

## References

1. Piskunov M. A., Voronov R. V., Vasiliev V. N., Voronova A. M. Distribution of passages along the length of the portage and calculation of the trip loads of a skidding tractor when moving on soils with low bearing capacity on the example of whiplash technology of logging. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 77, pp. 281—291. (In Russ.)
2. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A. Modeling of the fiber scheme by covering a hypernet with a weighted root tree. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2012, no. 2 (123), pp. 114—117. (In Russ.)
3. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A. The task of placing haulage and loading points on the cutting area and the issues of applying optimal schemes in practice. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2009, no. 9 (103), pp. 58—62. (In Russ.)
4. Voronov R. V., Voronova A. M., Piskunov M. A. The task of covering a hypernet with a weighted root tree and its application for optimal design of schemes of haulage in logging areas. *Informatics and control systems*, 2012, no. 1 (31), pp. 56—64. (In Russ.)
5. Khitrov E. G., Khakhina A. M., Luhminsky V. A., Kazakov D. P. Investigation of the relationship of the cone index and the modulus of deformation of various types of soils. *Resources and Technology*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 1—16. (In Russ.)
6. Khitrov E. G., Frolov I. I. Selection of the permissible pressure of the mover of wheeled forest machines depending on ground conditions. *Collection of articles based on the materials of the scientific and technical conference of the Institute of Technological Machines and Transport of Forests based on the results of research works in 2018*. Ed. by V. A. Sokolova. Saint Petersburg, 2019, pp. 90—100. (In Russ.)

7. Kotenev E. V., Khitrov E. G., Ilyushenko D. A., Masloboev L. A. Methodology for calculating forwarder productivity depending on soil and soil conditions. *Actual problems of forest complex development. Materials of the XVII International Scientific and Technical Conference*. Responsible editor Yu. M. Avdeev. Vologda, 2019, pp. 196—199. (In Russ.)
8. Khitrov E., Andronov A., Iliushenko D., Kotenev E. Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. Soils; forest ecosystems*. Sophia, 2019, pp. 649—656.
9. Khitrov E. G. Analysis of the components of the depth of the track formed under the influence of the propulsion of the forest machine on the soil. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 76—93. (In Russ.)
10. Khitrov E. G., Kotenev E. V. Comparison of indicators of interaction with the ground and the patency of wheeled and wheeled-tracked propellers. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 1—24. (In Russ.)
11. Ageikin Ya. S. All-terrain wheeled and combined propellers. Moscow, Mashinostroenie, 1972. 184 p. (In Russ.)
12. Khitrov E. G., Bozhbov V. E., Ilyushenko D. A. Calculation of the bearing capacity of forest soils under the influence of wheel movers. *The system. Methods. Technologies*, 2014, no. 4 (24), pp. 122—126. (In Russ.)
13. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Assessment of the bearing capacity of frozen and thawed soil with incomplete information about the state of its interaction with the skidding system. *The system. Methods. Technologies*, 2019, no. 2 (42), pp. 80—86. (In Russ.)
14. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Gulko A. E. Analysis of methods for calculating parameters and substantiation of a mathematical model of bark destruction during group debarking of wood. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2011, no. 8 (121), pp. 92—96. (In Russ.)
15. Bulychev N. S. *Mechanics of underground structures in examples and tasks: A textbook for universities*. Moscow, Nedra, 1989. 270 p. (In Russ.)
16. Kalabina M. V., Tsarapov M. N. Strength properties of thawing soils. *Current state, problems and prospects of development of branch science. Materials of the All-Russian conference with international participation*. Moscow, 2017, pp. 542—546. (In Russ.)
17. Kalyashov V. A., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I., Starodubtseva T. N. Investigation of the process of track formation and its stability during the operation of forest machines and skidding systems on the slopes of the thawing soil massif. *Forestry journal*, 2021, vol. 11, no. 2 (42), pp. 121—132. (In Russ.)
18. Mirny A. Yu. Studies of dilatancy in dispersed soils and methods of its quantitative assessment. *Engineering geology*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 34—43. (In Russ.)
19. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Variational method for calculating the parameters of the interaction of a skidding system with an array of frozen and thawing soils. *The system. Methods. Technologies*, 2019, no. 1 (41), pp. 68—77. (In Russ.)
20. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V. Deformation and cyclic compaction of soil between ground hooks of large-sized forest tires. *Technique and technology*, 2006, no. 2, pp. 94—100. (In Russ.)
21. Dobretsov R. Yu., Dmitriev A. S., Grigorev I. V. Problems and prospects of using machines with a half-track propulsion in the forest complex. *Bulletin of AGATU*, 2022, no. 4 (8), pp. 95—105. (In Russ.)

DOI: 10.15393/j2.art.20232.7183

УДК 625.711.84

*Статья*

## **Оптимальное проектирование сети лесных дорог: от методов к решениям**

**Катаров Василий Кузьмич**

*кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет  
(Российская Федерация), vkatarov@petrsu.ru*

**Рожин Данила Владимирович**

*кандидат технических наук, Упрдор «Кола» (Российская Федерация), hop@sampo.ru*

**Сюнёв Владимир Сергеевич**

*доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет  
(Российская Федерация), siounev@petrsu.ru*

*Получена: 22 июня 2023 / Принята: 5 сентября 2023 / Опубликована: 13 сентября 2023*

---

**Аннотация:** В статье приведены методы оптимального проектирования сетей лесных дорог, позволяющие провести автоматизацию процессов планирования дорожно-транспортной инфраструктуры лесозаготовительных предприятий с учётом особенностей строительства лесных дорог в современных условиях. Описана методика и приведены результаты нахождения оптимальной плотности лесных дорог для природно-производственных условий Северо-Западного федерального округа. В исследовании предложены модели принятия решений о выборе конструкций земляного полотна и дорожных одежд лесных дорог, модель оценки альтернативных участков лесных дорог, модель выбора ключевых точек лесосырьевой базы и итоговая оптимизационная модель принятия решений о размещении сети лесовозных дорог. Разработанная компьютерная система позволяет в удобном для пользователя виде послойно выводить информацию о необходимых объёмах дорожного строительства и получать широкий перечень показателей, характеризующих как отдельные участки, так и все дороги в целом. Применение данной системы показало достаточно высокую степень соответствия реальным условиям и возможность адаптации под задачи пользователя. Предлагаемые решения позволяют добиться значимого положительного экономического эффекта при горизонте планирования от 5—10 лет и больше.

**Ключевые слова:** лесная дорога; оптимальное проектирование; геоинформационные системы

---

DOI: 10.15393/j2.art.20232.7183

*Article*

## **Optimal planning of a forest road network: from methods to solutions**

**Vasily Katarov**

*Ph. D. in engineering, associate professor, Petrosavodsk State University (Russian Federation)*

*vkatarov@petrsu.ru*

**Danila Rozhin**

*Ph. D. in engineering, associate professor, «KOLA» Highway Administration (Russian Federation)*

*hop@sampo.ru*

**Vladimir Siounev**

*D. Sc. in engineering, professor, Petrosavodsk State University (Russian Federation)*

*siounev@petrsu.ru*

*Received: 22 June 2023 / Accepted: 5 September 2023 / Published: 13 September 2023*

---

**Abstract:** The article presents the methods of optimal planning of forest road networks, which allow automating the planning processes of road transport infrastructure development for logging enterprises by taking into account the characteristics of forest road construction under present day conditions. The methodology is described and the optimal density of forest roads has been found for the natural and industrial conditions of the North-Western Federal District. The authors propose decision-making models for choosing the forest roadbed and road topping designs. They also propose a model for evaluating alternative sections of forest roads, a model for selecting key points of the forest resource base and a final optimization model for making decisions on logging roads network design. The developed computer system allows the user to display information in a user-friendly and layer-by-layer form on the required road construction volumes and to obtain a wide list of indicators characterizing both individual sections and all roads as a whole. This system application demonstrated a reasonably good compliance with actual conditions and the ability to adapt to the user's tasks. The proposed solutions make it possible to achieve a significant economic effect for a planning horizon of 5—10 years or more.

**Keywords:** forest roads; optimal planning; geoinformation systems

---

## 1. Введение

В стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. [1] подчёркивается, что проблемы сохранения и использования лесов становятся всё более многообразными и сложными, изменяются стандарты управления лесами, которые должны отвечать возросшим технико-технологическим, социальным, экологическим и экономическим требованиям. В современных условиях особое значение для интенсификации использования и воспроизводства лесов приобретает лесная инфраструктура, прежде всего плотность сети лесных дорог. Для обеспечения повышенного прогнозируемого спроса на древесину в сфере заготовки целесообразным является внедрение современных технологий при проектировании, строительстве и последующем содержании и ремонте лесных дорог.

Трансформирующееся лесное законодательство [2] в настоящий момент определяет, что для обеспечения использования лесного участка на весь срок аренды (до 49 лет) должна быть разработана транспортная схема освоения лесного участка, включающая дороги постоянного круглогодового действия и дороги сезонного действия (зимние, летние). Это становится предпосылкой для создания развитой надёжной транспортной сети. Вместе с тем важнейшим остаётся вопрос ресурсного обеспечения принимаемых транспортно-технологических решений. В настоящий момент на лесозаготовительных предприятиях всё шире применяются компьютерные технологии с элементами искусственного интеллекта по проектированию и строительству лесных дорог. В этой связи актуальными представляются системы и методы проектирования сети лесных дорог, привязанные к рациональным технологиям строительства, учитывающие особенности районов проектирования [3—6]. При этом данные решения на стадии реализации должны иметь возможность корректировки в привязке к условиям предприятия [7], [8]. Оптимальным вариантом является возможность максимального использования местных дорожно-строительных материалов при строительстве, содержании и ремонте элементов дорожно-транспортной инфраструктуры и применение современных геосинтетических материалов [9—11].

Ввиду многокомпонентности задачи планирования лесотранспортного освоения лесосырьевых баз в качестве перспективного направления автоматизации управления в лесозаготовительной промышленности выступают системы, в которых в качестве одного из основных компонентов используются геоинформационные системы (ГИС), которые объединяют все возможности цифрового картографирования с системами обработки цифровой и текстовой информации, что позволяет совместить в одной системе графическую (картографическую) информацию об объекте с другими данными о нём [3], [5], [7], [12]. ГИС должны учитывать характеристики и работы по модернизации существующей сети дорог и возможность дополнения её новыми участками. Ряд исследователей также указывают на необходимость учёта многоцелевого использования лесных участков и воздействие дорожной сети на окружающую лесную среду [5], [13], [14].

## 2. Материалы и методы

Рентабельность планирования лесной дорожной инфраструктуры оценивают с помощью расчёта оптимальной плотности сети лесных дорог, достигаемой путём минимизации перспективных затрат на строительство и эксплуатацию дороги, а также расходов на вывозку лесоматериалов путём сокращения расстояний перевозки [9].

В лесной практике за единицу измерения плотности лесных дорог принимают протяжённость дорог в километрах или метрах на 1000, или 1 га лесной площади. Плотность лесных дорог постоянного действия на лесном участке зависит от расстояния между ветками и их направления относительно грузосборочной дороги (под прямым углом или под углом 45°). Обобщённые данные по рекомендуемой плотности лесных дорог [2] приведены в таблице.

**Таблица.** Рекомендуемая плотность лесных дорог

**Table.** Recommended density of forest roads

Расстояние трелёвки, м	Расстояние между лесовозными ветками, км			
	4	5	6	7
Направление примыкания под углом 45°				
300	23,1 (18,9 + 4,2)	23,4 (20,0 + 3,4)	22,9 (20,1 + 2,8)	23,2 (20,8 + 2,4)
500	19,2 (15,0 + 4,2)	19,0 (15,6 + 3,4)	18,3 (15,5 + 2,8)	17,8 (15,4 + 2,4)
Направление примыкания под углом 90°				
300	23,4 (20,4 + 3,0)	23,5 (21,1 + 2,4)	23,6 (21,6 + 2,0)	23,6 (21,9 + 1,7)
500	21,0 (18,0 + 3,0)	21,6 (19,2 + 2,4)	22,0 (20,0 + 2,0)	22,3 (20,6 + 1,7)

*Примечание.* В скобках первое число обозначает протяжённость временных лесных дорог, второе число — лесных дорог постоянного действия.

Для расчёта оптимальной плотности лесных дорог у нас, и за рубежом разработано достаточно большое количество методик, нашедших отражение в ряде работ [5], [6], [15]. Вместе с тем для использования на лесозаготовительных предприятиях Северо-Западного федерального округа считаем целесообразным применение методики, апробированной в схожих природно-производственных условиях [9], [15].

По данной методике оптимальная плотность сети лесных дорог достигается путём минимизации затрат на строительство и эксплуатацию дорог, а также расходов на перевозку (трелёвку) лесоматериалов за счёт сокращения расстояний перевозки. Оптимизацию

плотности сети дорог сводят к задаче сравнения затрат на перевозку лесоматериалов с затратами на строительство, для чего используют следующие формулы:

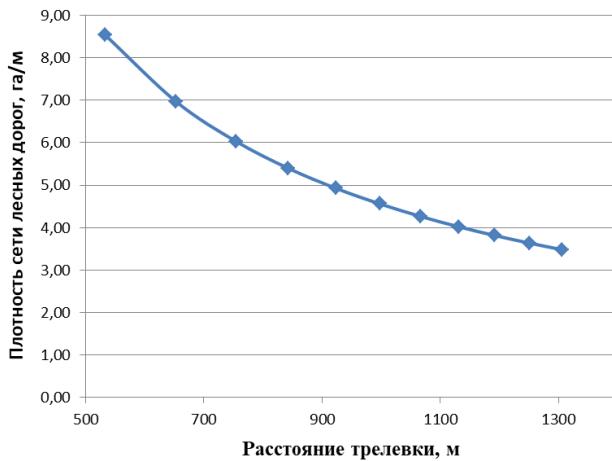
$$L = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{C \cdot M \cdot T}{Q \cdot A}}, \quad (1)$$

$$V = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot A \cdot M \cdot T}{C}}, \quad (2)$$

где  $L$  — оптимальное расстояние трелёвки;  $V$  — оптимальная плотность лесных дорог;  $A$  — удельные затраты на трелёвку форвардером;  $C$  — удельные затраты на строительство дороги;  $Q$  — объём древесины, получаемый из зоны действия дороги за расчётный период;  $M$  — поправка на трелёвку по условиям местности;  $T$  — коэффициент сети дорог.

Поправка на трелёвку  $M$  корректирует разницу между прямолинейным и реальным расстоянием трелёвки, вызванную криволинейностью движения форвардера на местности (необходимость огибать препятствия, расположение лесопогрузочной площадки). Поправка варьируется в интервале от 1,2 до 1,6 в различных условиях. Рекомендуется использовать значение 1,4, которое характеризует средние условия трелёвки на Северо-Западе РФ. Коэффициент сети дорог  $T$  характеризует степень перекрытия зон влияния дорог. Например, использование значения коэффициента, равного 1,2, означает, что 83 % (1/1,2 ~ 83) лесосеки внутри сети дорог находится в зоне досягаемости только одной дороги, а остальная часть (17 %) — в зоне досягаемости нескольких дорог. Соответственно, при значении коэффициента 2,0 эффективность использования дорог ухудшается настолько, что уже половина лесосек одновременно находится в зоне влияния нескольких дорог. В расчётах коэффициент сети дорог  $T$  варьируется от 1,2 до 2,0 так, что для условий разряженной дорожной сети с лёгкими условиями местности используются небольшие значения коэффициентов, и наоборот.

Взаимосвязь между оптимальным расстоянием перевозки (трелёвки) и оптимальной плотностью лесных дорог применительно к условиям Республики Карелия представлена на рисунке 1. Для достижения приведённых параметров оптимальной плотности лесных дорог при их проектировании можно воспользоваться рядом методов, в частности, методами Монте-Карло, динамического программирования, Штейнера, принципами оптимальности Беллмана. Исследования [16] показали, что для определения рационального начертания сети с помощью компьютера может быть использован метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), позволяющий организовать целенаправленный пересмотр вариантов дорожной сети и тем самым выявить наивыгоднейший вариант сети без перебора всех возможных решений. Из всех возможных вариантов развития сети следует выбирать вариант, имеющий наиболее рациональное соотношение капитальных и транспортно-эксплуатационных затрат при высоких качественных показателях.



**Рисунок 1.** Зависимость оптимальной плотности лесных дорог от оптимального расстояния трелёвки

**Figure 1.** Dependence of the optimal density of forest roads on the optimal distance of skidding

Задача определения рационального начертания дорожной сети формулируется при этом следующим образом. Для выполнения объёма перевозок требуется построить (или реконструировать) сеть дорог определённых категорий, обеспечивающую минимальное значение критерия оптимизации при соблюдении всех строительных норм и правил. За критерий оптимизации дорожной сети обычно принимают сумму приведённых затрат. Для сетей лесных дорог сумма приведённых затрат может быть определена по формуле

$$K = \sum_{t=1}^{T_C} \frac{C_t}{(1+E_{HPI})^t} + \sum_{t=1}^{T_3} \frac{\mathcal{E}_t + M_t}{(1+E_{HPI})^t}, \quad (3)$$

где  $C_t$  — годовые капиталовложения в строительство и реконструкцию дорог;  $\mathcal{E}_t$  — годовые дорожно-эксплуатационные расходы (расходы на ремонт и содержание дорог);  $M_t$  — годовые транспортно-эксплуатационные расходы;  $T_C$  — срок завершения работ по приведению сети дорог в соответствии с требованиями;  $T_3$  — срок службы дороги до наступления износа по постоянным элементам;  $E_{HPI}$  — норматив для приведения разновременных затрат.

В математической формулировке задача выбора оптимального варианта начертания дорожной сети может быть представлена следующим образом: найти такой вектор-решение сети  $X_{OPT}$ , который отвечал бы всем строительным нормам и правилам и максимально минимизировал критерий оптимизации  $K$ , т. е.

$$\begin{aligned} K(X_{OPT}) &= \min K(X), \\ X_{OPT} &\in X, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $X$  — множество векторов-решений дорожной сети.

Следует отметить, что оптимальное решение сети может быть найдено лишь при условии, что имеющаяся исходная информация (объёмы перевозок между корреспондирующими пунктами, состояние существующих дорог, показатели строительной стоимости, транспортно-эксплуатационные показатели и т. д.) достоверна и достаточна для отыскания оптимума.

Выявление оптимального решения сети методом Монте-Карло заключается в следующем. Вначале разрабатываются статистические (случайные) варианты дорожной сети. Количество таких вариантов определяется по формуле

$$N_c = \frac{\ell g(1-P)}{\ell g(1-\Delta)}, \quad (5)$$

где  $P$  — вероятность нахождения оптимального варианта сети;  $\Delta$  — точность поиска наивыгоднейшего решения.

Для каждого статистического варианта сети дорог определяется критерий оптимизации — сумма приведённых затрат. Тот вариант, который имеет самое минимальное значение суммы приведённых затрат, и будет оптимальным.

Основные исследования на сеточных моделях могут быть проведены с использованием методов динамического программирования и принципа оптимальности Беллмана, суть которого состоит в том, что оптимальная стратегия (поведение) обладает тем свойством, что каковы бы ни были начальные состояния и начальное решение, последующие решения должны составлять оптимальную стратегию (поведение) относительно первоначального состояния. Одним из наиболее эффективных численных алгоритмов, позволяющих реализовать данный принцип, являются алгоритм Ли и его модификации [17], [18].

$$\int_{X_0}^{X_N} Z(X, Y) \sqrt{1+Y'^2} * dX \Rightarrow \min \quad (6)$$

где  $Z(X, Y)$  — обобщённо характеризует район располагаемого строительства линейного сооружения с точки зрения удельных приведённых затрат на трассирование. Значения удельных затрат представляют собой расчётные затраты (на строительство и эксплуатацию) конечного элемента линейного сооружения единичной длины и отнесены к некоторой точке  $(X, Y)$  плана местности.

Алгоритм прогноза и коррекции состоит из двух основных процедур. Первоначально на крупной сетке, учитывающей основные неоднородности рельефа с точки зрения затрат на прокладку трассы, находят перспективные трассы линейного сооружения. На втором этапе перспективные трассы корректируются, причём коррекция выполняется на мелкой сетке, учитывающей все особенности рельефа.

Процедура прогноза реализуется на основе алгоритма Ли и состоит в следующем. На каждом шаге алгоритма реализуются все ветки, построенные от начальной точки трассы, и определяется путь с наименьшей стоимостью. Этот путь на данном шаге является наиболее

перспективным. Надстраивая его на одну дугу во всех допустимых сеткой направлениях, получаем несколько дополнительных путей. Затем среди всех путей, построенных к очередному шагу алгоритма, ищем новый, наиболее перспективный, и надстраиваем его на одну новую дугу во всех допустимых сеткой направлениях. Этот процесс продолжается до тех пор, пока среди сформированных последовательной надстройкой путей не окажется путь, оканчивающийся последней точкой трассы и имеющий минимальную стоимость по сравнению со стоимостями всех сформированных к этому моменту путей.

Опыт реализации крупных международных проектов в Петрозаводском государственном университете, работы с лесозаготовительными холдингами, внедрения продуктов по автоматизации производств показал достаточно эффективный результат при применении в разработке систем оптимального планирования сети лесных дорог методом Штейнера.

Метод Штейнера предполагает соединение заданных на плоскости точек оптимальным образом. На плоскости, по своим свойствам являющейся неоднородным пространством, заданы фиксированные координаты точек, в которых сосредоточены запасы груза с заданными объёмами. Запасы требуется вывезти в фиксированную точку. Для этого должна быть построена сеть дорог в виде дерева, состоящего из прямолинейных отрезков, соединяющих фиксированные и дополнительные точки таким образом, чтобы достигало минимума значение целевой точки. Дополнительные точки — это свободно размещаемые развилики в любом необходимом количестве.

Кратчайшей связывающей сетью для фиксированных точек на плоскости называется дерево с вершинами в этих точках, имеющее минимальное значение суммы длин дуг среди всех связывающих сетей. Точками Штейнера называются развилики, которые добавляются к дереву для уменьшения значения. Топология дерева однозначно описывает связность вершин. Топологию, учитывающую направленность, назовём ориентированной.

Относительно минимальным деревом называется дерево, на котором сумма длин дуг принимает наименьшее значение среди деревьев той же топологии. Такая локальная минимизация достигается оптимальным положением точек Штейнера.

Деревом Штейнера называется дерево, значение функционала которого нельзя уменьшить путём введения дополнительной точки Штейнера (операцией расщепления вершины). Дерево Штейнера является относительно минимальным для своей топологии. Минимальным деревом Штейнера будет дерево, связывающее точки с использованием любого количества точек Штейнера и имеющее минимальное значение функционала среди всех деревьев Штейнера для данного набора. Задача сводится к поиску минимального дерева Штейнера. Её решение имеет три уровня [18].

*Первый уровень* — нахождение оптимально минимального дерева для заданной топологии. При этом количество точек Штейнера и связность всех вершин заданы. Фактически это задача многопараметрической оптимизации непрерывной целевой функции.

*Второй уровень* — построение деревьев Штейнера. Это реализация процедуры Штейнера (расщепления вершин) с последующим решением задачи первого уровня: оптимизации положения полученных точек Штейнера.

*Третий уровень* — поиски минимального дерева Штейнера. На этом уровне ищется приближенное решение задачи в том смысле, что количество возможных вариантов построения дерева (число топологий) стремительно растёт с увеличением количества точек и очень быстро становится необозримо большим, и, таким образом, фактически невозможно просмотреть все топологии. Поскольку, помимо полного перебора, другого точного решения задачи Штейнера пока не имеется, речь идёт о выборе варианта, лучшего из просмотренных. На этом уровне решающим фактором становится машинное время решения. Соответственно содержательной интерпретацией задачи может служить следующая: в заданный промежуток машинного времени построить максимально возможное число деревьев Штейнера и выбрать одно или несколько лучших по критерию минимальности целевой функции.

Так, согласно исследованию [19], в качестве входных данных авторы рекомендуют использовать матричный подход: составляются матрица затрат на прокладку дороги до каждого лесоучастка, т. е. матрица весов рёбер графа; матрица затрат на восстановительные работы; массив, задающий годы, в которые понадобится путь к каждой вершине графа; массив, определяющий величину товарной продукции, которая может быть получена при разработке каждого лесоучастка.

Важнейшим элементом при проектировании сети лесных дорог являются предлагаемые нами оптимизационная модель принятия решений о выборе конструкций земляного полотна и дорожных одежд лесных дорог и модель оценки альтернативных участков лесных дорог. Оптимизационная модель принятия решений о выборе конструкций земляного полотна и дорожных одежд лесных дорог в общем виде выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} C_d = f(c, B, h_{Pcp}, h_{Occ}, E_{GP}, C_\Sigma, l_0, l_p, l_{3P}, C_{41}, C_{42}, C_{GM}) \rightarrow \min \\ E_\phi(h_{Pcp}, h_{Occ}, E_{GP}, E_0, E_p, \alpha) \geq K_{PP}^{TP} \cdot E_{TP}(N) \\ h_{Pcp}, h_{Occ} \geq 0,05 \text{ м} \\ C_\Sigma, l_0, l_p, l_{3P}, C_{GM}, \alpha \geq 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $C_d$  — общие затраты на строительство участка дороги;  $c$  — ширина обочины;  $B$  — ширина проезжей части;  $h_{Pcp}$  — средняя толщина покрытия дорожной одежды (ПДО);  $h_{Occ}$  — средняя толщина основания дорожной одежды (ОДО);  $E_{GP}$  — модуль упругости грунта земляного полотна;  $C_\Sigma$  — общая стоимость строительных материалов дорожной одежды;  $l_0$  — расстояние транспортировки материала ОДО;  $l_p$  — расстояние транспортировки материала ПДО;  $l_{3P}$  — расстояние транспортировки материала ЗП;  $C_{41}$  — стоимость устройства водопропускных сооружений — труб;  $C_{42}$  — стоимость устройства водопропускных сооружений — мостов;  $C_{GM}$  — стоимость армирования геоматериалами;  $E_\phi$  — фактический модуль упругости дорожной одежды;  $E_0$  — модуль

упругости материала ОДО;  $E_{\text{П}}$  — модуль упругости материала ПДО;  $\alpha$  — коэффициент упрочнения дорожной одежды при армировании геоматериалами;  $K^{TP}_{\text{ПР}}$  — требуемый коэффициент прочности дорожной одежды по критерию упругого прогиба;  $E_{TP}$  — минимальный требуемый общий модуль упругости конструкции;  $N$  — количество приложений нагрузки от осей с нагрузкой 10 т в межсезонье [20].

Управляемыми переменными в данном случае являются  $h_{\text{Пср}}, h_{\text{Ocp}}, C_{\Sigma}, l_0, l_{\text{п}}, l_{\text{зп}}, C_{\text{ГМ}}, \alpha$ . Таким образом, в результате решения поставленной задачи определяются оптимальные толщины слоёв дорожной одежды, подбираются карьеры для строительства и, если необходимо, способ упрочнения дорожной одежды, соответствующие минимальным затратам на строительство участка с учётом начальных условий местности.

Для обеспечения работы алгоритма построения оптимальной сети лесных дорог каждый альтернативный участок дорог должен быть оценён в соответствии с перспективностью его строительства. В качестве соответствующей оценки предлагается применить стоимостной критерий, равный разности между выигрышем, получаемым от возможности заготовки в соответствующем сегменте, и затратами, связанными со строительством этого участка дороги:

$$K_{\text{АД}} = C_K - C_{\text{Д}}, \quad (8)$$

где  $C_K$  — выигрыш, получаемый от возможности заготовки в соответствующем сегменте:

$$C_K = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_i \cdot (h_{ij} \cdot C_{ij} - L_{Tij} \cdot C_{Tij}), \quad (9)$$

где  $n$  — число пород деревьев, заготавливаемых в рассматриваемом участке;  $m$  — число видов продукции, получаемой на делянках;  $V_i$  — объём разрешённой к заготовке в расчётном периоде спелой и перестойной древесины  $i$ -й породы в квартале;  $h_{ij}$  — средняя доля  $j$ -го вида продукции, получаемой из  $i$ -й породы;  $C_{ij}$  — прогнозируемая на расчётный период средняя цена  $j$ -го вида продукции, получаемой из  $i$ -й породы;  $C_{Tij}$  — средние затраты на транспортировку 1 м<sup>3</sup>  $j$ -го вида продукции, получаемой из  $i$ -й породы, на расстояние 1 км;  $L_{Tij}$  — среднее расстояние перевозки  $j$ -го вида продукции, получаемой из  $i$ -й породы для данного сегмента.

Для более точного учёта местонахождения наиболее привлекательных с точки зрения заготовки участков леса предлагается произвести корректировку величины  $C_K$  каждого сегмента с учётом величин  $C_K$  соседних сегментов внутри круга заданного радиуса  $R$ . Скорректированное значение определяется по следующей формуле:

$$C'_K = C_K \cdot (1 - g) + \frac{g \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_{Ki}}{d_i^N}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^N}}, \quad (10)$$

где  $C_K$  — исходное значение выигрыша, получаемого от возможности заготовки в сегменте;  $g$  — степень влияния соседних кварталов ( $g = 0,1-0,5$ );  $n$  — число соседних сегментов, попавших внутрь круга заданного радиуса  $R$ ;  $C_{Ki}$  — исходные значения выигрыша, получаемого от возможности заготовки в соседних сегментах, попавших в внутрь круга радиусом  $R$ ;  $d_i$  — расстояние от центроида рассматриваемого сегмента до центроида  $i$ -го соседнего сегмента;  $N$  — параметр интерполяции ( $N = 1-3$ ).

Вычисленные таким образом величины  $K_{AD}$ ,  $C_K$  и  $C'_K$  заносятся в соответствующие поля баз данных сегментов и альтернативных участков лесных дорог. Далее строится модель выбора ключевых точек лесосырьевой базы, которая применяется для определения множества целевых вершин, т. е. тех сегментов, к которым целесообразнее всего вести дорогу. В этой стадии процесса участвует пользователь системы. Сначала он задаёт число целевых точек. Система предлагает ему соответствующее число сегментов с наибольшими значениями  $C'_K$ . Далее пользователь может скорректировать число и расположение целевых точек. Для его удобства с помощью метода IDW-интерполяции строится тематическая карта (поверхность), где цветом выделяются зоны, более благоприятные и менее благоприятные с точки зрения заготовки:

$$C'_{Kpic} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C'_{Ki}}{d_i^N}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^N}}, \quad (11)$$

где  $C'_{Kpic}$  — значение  $C'_K$  для рассматриваемого пикселя строящейся растровой тематической карты;  $n$  — число сегментов, попавших внутрь круга заданного радиуса  $R$ ;  $C'_{Ki}$  — значение  $C'_K$  для  $i$ -го квартала, попавшего внутрь круга радиусом  $R$ ;  $d_i$  — расстояние от рассматриваемого пикселя до центроида  $i$ -го сегмента, попавшего внутрь круга радиусом  $R$ .

Для получения итогового плана дорожной сети предлагается оптимизационная модель принятия решений о размещении сети лесовозных дорог. Размещение оптимальной сети лесовозных дорог производится в процессе решения задачи Штейнера на сгенерированном графе [21], [22], дугами которого являются альтернативные участки дорог, связывающие соседние лесные сегменты. Данная задача заключается в определении частичного подграфа, содержащего пути в каждую из целевых вершин при условии максимума суммы весов всех задействованных при этом дуг. В качестве весов при этом выступают величины  $K_{AD}$ .

Поставленная задача решается методом динамического программирования [23], [24] со следующим основным рекуррентным соотношением:

$$\nu(s, j) = \max(\max(\nu(s', j) + \nu(s \setminus s', j) | s' \subset s), \max(c_u + \nu(s, j_{e(u)}) | j_{b(u)} = j)), \quad (12)$$

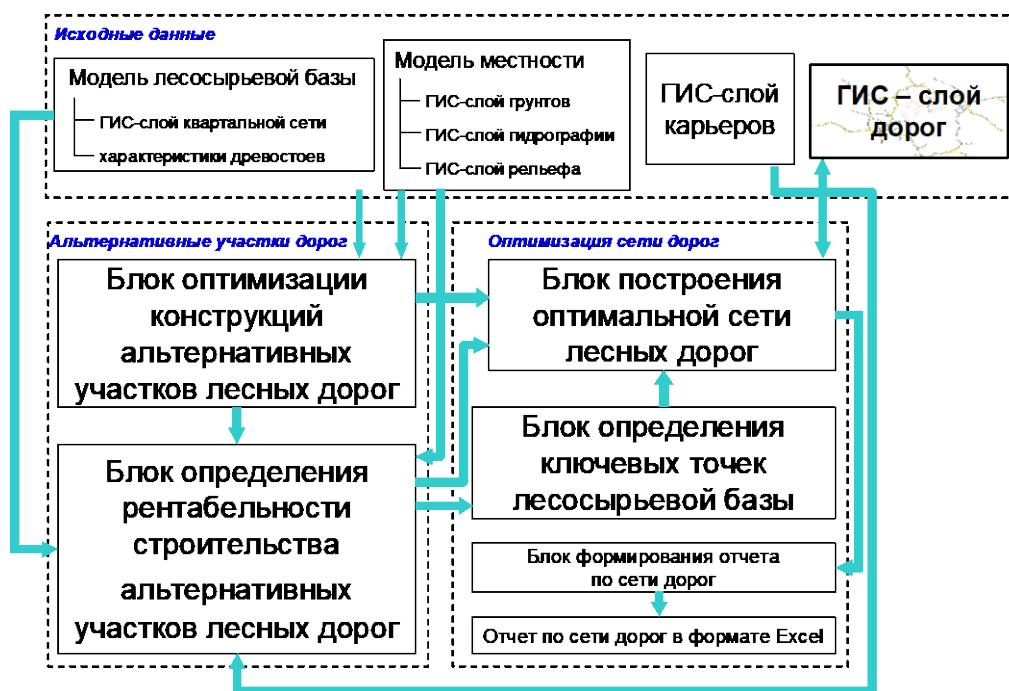
где  $s$  — подмножество множества целевых вершин;  $j$  — вершина, из множества целевых вершин;  $u$  — управление, заключающееся в выборе дуги, соединяющей вершину  $j$

с вершинами вне подмножества  $s$ ;  $c_u$  — вес дуги, соответствующей управлению  $u$ ;  $j_{e(u)}$  — конечная вершина дуги, соответствующей управлению  $u$ ;  $j_{b(u)}$  — начальная вершина дуги, соответствующей управлению  $u$ .

Задача на финальном этапе решается в среде ГИС.

### 3. Результаты

На основе описанных выше методов в Петрозаводском государственном университете разработана и апробирована в ряде лесопромышленных предприятий Северо-Западного федерального округа компьютерная информационно-вычислительная система для решения задачи оптимального проектирования сети лесных дорог. Данная система включает значительное разумное количество входных данных и имеет высокую степень адаптации под реальные условия (рисунок 2).

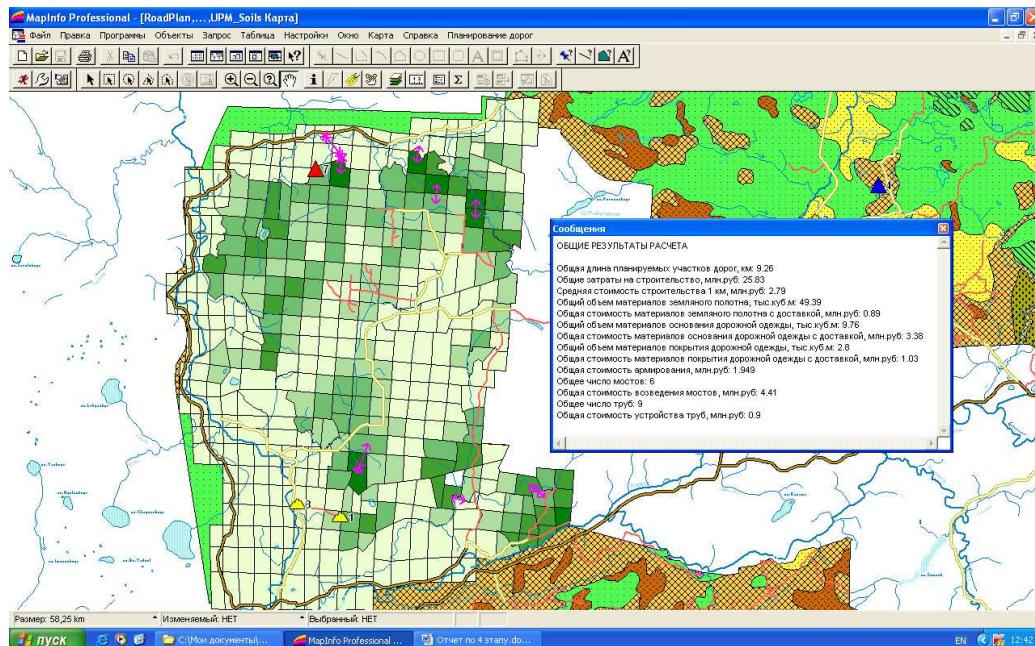


**Рисунок 2.** Структура компьютерной информационно-вычислительной системы для решения задачи проектирования сети лесных дорог (для уровня детализации — лесной квартал)

**Figure 2.** design of an information computer system for solving the problem of planning a forest road network (detail level — a forest compartment)

Система позволяет формировать отчёты о структуре планируемых лесных дорог и наносит местоположение новых участков дорог, а также выводит окно с общими результатами расчёта такими, как общая длина планируемых участков, общие затраты на строительство, средняя стоимость строительства одного километра лесной дороги и т. д. (рисунок 3).

Кроме того, можно получить подробные сведения о конструкции каждого отдельного участка проектируемой сети дорог, включая толщины слоёв земляного полотна и дорожной одежды, подобранную технологию строительства, необходимость армирования, объёмы материалов, затраты и т. д.



**Рисунок 3.** Результат моделирования размещения сети лесных дорог

**Figure 3.** The model of a forest road network design

Кроме основной задачи — построения оптимальной сети лесовозных автомобильных дорог, разработанная система позволяет решать задачу оптимизации конструкций участков дорог, местоположение и трассы которых задаются пользователем. Система оптимизирует конструкции с учётом грунтовых условий и затрат на закупку и доставку материалов из близлежащих карьеров, а также с учётом возможностей применения современных упрочняющих геоматериалов.

#### 4. Обсуждение и заключение

Предлагаемая система оптимального проектирования дорожной сети позволяет создать эффективный план развития дорожно-транспортной инфраструктуры лесозаготовительного предприятия, учитывающий значительное количество природно-производственных факторов и базирующийся на применении современных технологий обработки и отображения данных, ресурсосберегающих методов дорожного строительства и использовании высокопрочных геосинтетических материалов. Полученные автоматизированным способом трассы лесных дорог могут быть уточнены с точки зрения учёта различных дополнительных факторов местности и запросов пользователя.

## Список литературы

- Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.09.2018 № 1989-р.
- СП 288.1325800.2016 Дороги лесные. Правила проектирования и строительства. Утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16.12.2016 № 952/пр.
- Совершенствование системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог / Ю. Ю. Герасимов, А. П. Соколов, В. К. Катаров [и др.] // Учёные записки ПетрГУ. 2013. № 8 (137). С. 70—76.
- Громская Л. Я., Симоненков М. В. Современное состояние моделирования и оптимизации лесных дорог // Лесной журнал. 2016. № 5. С. 108—122. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.108.
- Информационно-интеллектуальные системы проектирования сетей лесовозных автомобильных дорог / Д. Г. Козлов, В. В. Никитин, А. В. Скрыпников [и др.]. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. аграрного ун-та, 2021. 206 с.
- Heinimann H. R. Forest Road Network and Transportation Engineering — State and Perspectives // Croatian Journal of Forest Engineering. 2017. Vol. 38 (2). P. 155—173.
- Соколов А. П., Катаров В. К., Сюнёв В. С. Логистическая поддержка лесозаготовок. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2015. 160 с.
- Бурмистрова О. Н., Пластинина Е. В., Воронина М. А. Математическая модель проектирования лесовозных автомобильных дорог с учётом климатических условий Северо-Западного региона // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2011. Вып. 4 (8). С. 79—84.
- Проектирование, строительство, содержание и ремонт лесных дорог: Учеб. пособие / В. К. Катаров, Н. В. Ковалёва, А. Н. Кочанов [и др.]. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 92 с.
- Кииискайнен П., Савонен Х., Томпери Т. Строительство лесной дороги. Йоэнсуу: НИИ Леса Финляндии, 2014. 52 с.
- Рожин Д. В. Применение геосинтетических материалов при строительстве лесовозных дорог // Труды лесоинженерного факультета. 2010. № 8. С. 126—127.
- Seo J., Kang S. Geographic information system based roadway construction planning // Canadian Journal of Civil Engineering. 2006. Vol. 33. P. 508—520.
- Еналеева-Бандура И. М., Ковалев Р. Н., Баранов А. Н. Принципы и методы оценки эффективности лесотранспортной сети в условиях многоцелевого лесопользования: [монография]. Красноярск: Изд-во СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. 178 с.
- Gumus S., Acar H. H., Toksoy D. Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting // Environ Monit Assess. 2008. Vol. 142. P. 109—116.
- Uotila E., Viitala E.-J. Optimaalinen tietiheys yksityismetsälouden kannalta // Metsätieteen aikakauskirja. 1999. No. 2. P. 167—179.
- Рекомендации по проектированию автомобильных дорог областного и местного значения. М.: Министерство транспортного строительства СССР, 1970. 37 с.
- Борисов Г. А. Проблемы автоматизации проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов // Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов. Петрозаводск, 1978. С. 4—9.
- Борисов Г. А. Методы автоматизированного проектирования лесотранспорта. Петрозаводск: Карелия, 1978. 19 с.

19. Михиров А. П., Болотов О. В. Автоматизированное проектирование и оптимизация транспортной схемы освоения лесосырьевой базы. URL: [http://science-bsea.bgita.ru/2003/leskomp\\_2003/mohirev.htm](http://science-bsea.bgita.ru/2003/leskomp_2003/mohirev.htm) (дата обращения: 15.04.2023). Текст: электронный.
20. Расчёт стоимости строительства альтернативных участков лесовозных дорог / В. К. Катаров, Д. В. Рожин, М. В. Тюнен, И. В. Редозубов // Транспортное дело России. 2010. № 2 (75). С. 106—111.
21. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
22. Лотарев Д. Т. Задача Штейнера для транспортной сети на поверхности, заданной цифровой моделью // Автоматика и телемеханика. 1980. Т. 10. С. 104—115.
23. Андреев В. Н., Герасимов Ю. Ю. Принятие оптимальных решений в лесном комплексе. Йоэнсуу: Изд-во Университета Йоэнсуу, 1999. 200 с.
24. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Иностранная литература, 1960. 400 с.

## References

1. Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated 20.09.2018 No. 1989-r. (In Russ.)
2. CN 288.1325800.2016 Forest roads. Planning and construction standards. Approved by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 16.12.2016 No. 952/pr. (In Russ.)
3. Gerasimov Yu. Yu., Sokolov A. P., Katarov V. K., Syuney V. S., Rozhin D. V., Kovaleva N. V. Improvement of the system of optimal planning of the forest roads network. *Scientific notes of PetrSU*, 2013, no. 8 (137), pp. 70—76. (In Russ.)
4. Gromskaya L. Ya., Simonenkov M. V. The current state of modeling and optimization of forest roads. *Lesnoy zhurnal*, 2016, no. 5, pp. 108—122. doi: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.108. (In Russ.)
5. Kozlov D. G., Nikitin V. V., Skrypnikov A. V., Bryukhovetsky A. N., Sapelkin R. S., Tikhomirov P. V., Tveritnev O. N., Denisenko V. V. *Information and intelligent systems for the planning of logging road networks*. Voronezh, Publishing House of the Voronezh State Agrarian University, 2021. 206 p. (In Russ.)
6. Heinemann H. R. Forest Road Network and Transportation Engineering—State and Perspectives. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, vol. 38 (2), pp. 155—173.
7. Sokolov A. P., Katarov V. K., Syuney V. S. *Logistical support of logging*. Petrozavodsk, Publishing House of PetrSU, 2015. 160 p. (In Russ.)
8. Burmistrova O. N., Plastinina E. V., Voronina M. A. Mathematical model of logging roads design taking into account climatic conditions of the North-Western region. *Proceedings of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 4 (8), pp. 79—84. (In Russ.)
9. Katarov V. K., Kovaleva N. V., Kochanov A. N., Markov V. I., Petrov A. N., Ratkova E. I., Rozhin D. V., Stepanov A. V., Sokolov A. P., Syuney V. S. *Planning, construction, maintenance and repair of forest roads: textbook*. Petrozavodsk, Publishing House of PetrSU, 2014. 92 p. (In Russ.)
10. Kiiskinen P., Savonen H., Tampere T. *Construction of a forest road*. Joensuu, Finnish Forest Research Institute, 2014. 52 p. (In Russ.)
11. Rozhin D. V. The use of geosynthetic materials in the construction of logging roads. *Proceedings of the Faculty of Forestry Engineering*, 2010, no. 8, pp. 126—127. (In Russ.)

12. Seo J., Kang S. Geographic information system based roadway construction planning. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 508—520.
13. Enaleeva-Bandura I. M., Kovalev R. N., Baranov A. N. *Principles and methods of assessing the effectiveness of the forest transport network in conditions of multi-purpose forest management: [monograph]*. Krasnoyarsk, Publishing house of SibGU named after M. F. Reshetnev, 2022. 178 p. (In Russ.)
14. Gumus S., Acar H. H., Toksoy D. Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting. *Environ Monit Assess*, 2008, vol. 142, pp. 109—116.
15. Uotila E., Viitala E.-J. Optimaalinen tietiheys yksityismetsälouden kannalta. *Metsätieteen aikakauskirja*, 1999, no. 2, pp. 167—179.
16. Recommendations for the planning of highways of regional and local significance. Moscow, Ministry of Transport Construction of the USSR, 1970. 37 p. (In Russ.)
17. Borisov G. A. Problems of automation of planning of transport and meliorative development of woodlands. *Automation of planning of transport and meliorative development of woodlands*. Petrozavodsk, 1978, pp. 4—9. (In Russ.)
18. Borisov G. A. *Methods of automated design of forest transport*. Petrozavodsk, Karelia, 1978. 19 p. (In Russ.)
19. Mohirev A. P., Bolotov O. V. *Computer-aided planning and optimization of the transport scheme for the development of the forest resource base*. URL: [http://science-bsea.bgita.ru/2003/leskomp\\_2003/mohirev.htm](http://science-bsea.bgita.ru/2003/leskomp_2003/mohirev.htm) (accessed: 15.04.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
20. Katarov V. K., Rozhin D. V., Tuyunen M. V., Redozubov I. V. Calculation of the cost of construction of alternative sections of logging roads. *Transport business of Russia*, 2010, no. 2 (75), pp. 106—111. (In Russ.)
21. Kristofides N. *Graph theory. Algorithmic approach*. Moscow, Mir, 1978. 432 p. (In Russ.)
22. Lotarev D. T. Steiner's problem for a transport network on a surface defined by a digital model. *Automation and telemechanics*, 1980, vol. 10, pp. 104—115. (In Russ.)
23. Andreev V. N., Gerasimov Yu. Yu. *Making optimal decisions in the forest complex*. Joensuu, Publishing House of the University of Joensuu, 1999. 200 p. (In Russ.)
24. Bellman R. *Dynamic programming*. Moscow, Foreign literature, 1960. 400 p. (In Russ.)

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7023

УДК 630.2:582.475.4:581.4

*Статья*

## **Продолжительность жизни хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)**

**Тюкавина Ольга Николаевна**

*доктор сельскохозяйственных наук, доцент ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» (Российская Федерация), o.tukavina@narfu.ru*

**Корепин Дмитрий Юрьевич**

*инженер отдела дистанционных наблюдений и ГИС, Филиал ФБУ «Рослесозащита» «ЦЗЛ Архангельской области» (Российская Федерация), korepin.mitya@yandex.ru*

*Получена: 10 апреля 2023 / Принята: 5 сентября 2023 / Опубликована: 19 сентября 2023*

---

**Аннотация:** Выявление стандартного периода удержания хвои деревом, характерного для конкретного региона, необходимо для использования продолжительности жизни хвои в качестве критерия оценки состояния хвойных древесных растений и как критерий благополучности условий произрастания. Информация о продолжительности жизни хвои и влияние на неё различных факторов противоречива. Целью работы является оценка продолжительности жизни хвои сосны в различных условиях произрастания. Исследования проводили в сосновых лиственных, брусничных, черничных, кустарниково-сфагновых осушенных, осоково-сфагновых, кустарниково-сфагновых, сосна по болоту в северо-таёжном и южно-таёжном лесорастительных районах. Оценку проводили по 15 модельным деревьям, выбранным пропорционально представленности по ступеням толщины, по трём модельным ветвям из средней части кроны. Рассмотрено влияние типа леса, возраста, густоты древостоя, осушения, подтопления, рекреации на продолжительность жизни хвои сосны. Стабильность средней продолжительности жизни хвои при изменении типа леса, лесорастительной зоны указывает на оптимальное значение данного показателя для конкретной возрастной группы. В молодом насаждении средняя продолжительность жизни хвои составляет 3,2 года; в средневозрастном и приспевающем древостое — 4,3—4,8 года. В угнетённом состоянии у сосны на болоте или в результате антропогенного подтопления продолжительность

жизни хвои снижается. В результате гидромелиорации вблизи осушителя продолжительность жизни хвои возрастает, а в межканальном пространстве — остаётся на уровне естественных насаждений. Влияние рекреации на длительность удержания хвои в кроне зависит от стадии дигрессии. Снижение продолжительности жизни хвои отмечается при III стадии дигрессии. Продолжительность жизни хвои обусловлена способностью противостоять стрессовому фактору. Следовательно, механизмом адаптации деревьев к внешнему воздействию является увеличение продолжительности жизни хвои. Отпад хвои старших возрастов обусловлен неспособностью адаптироваться к негативному воздействию.

**Ключевые слова:** продолжительность жизни хвои; лесорастительные условия; сосна; подтопление; осушение; рекреация

---

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7023

Article

## Longevity of common pine needle (*Pinus sylvestris* L.)

**Olga Tyukavina**

*D. Sc. in agriculture, associate professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, leading researcher of the Northern research institute of Forestry (Russian Federation), o.tukavina@narfu.ru*

**Dmitry Korepin**

*Engineer of the Department of Remote Observations and GIS, Federal State Institution «Russian Forest Protection» «Forest Protection Center of the Arkhangelsk region» (Russian Federation), korepin.mitya@yandex.ru*

*Received: 10 April 2023 / Accepted: 5 September 2023 / Published: 19 September 2023*

---

**Abstract:** Identification of the standard period of tree needle retention characteristic for a particular region is necessary to use the pine needle longevity as criteria for assessing coniferous woody plants state and productive growing conditions. Information about the pine needle longevity and various affecting factors is contradictory. The aim of the work was to estimate the pine needle longevity in various growing conditions. The studies were conducted in lichen, cranberry, blueberry, shrub-sphagnum drained pine forests and in sedge-sphagnum, pitch pine forests in the north and south taiga forest areas. The authors assessed 15 model trees selected proportionally by the thickness steps on 3 model branches in the middle part of the crown. The influence of forest type, age, stand density, drainage, raised water table, and recreation on pine needle longevity was considered. The stability of the average pine needle longevity in various forest types and forest-growing zones determined the optimal value of this indicator for a specific age group. In the young plantation the average needle longevity was 3.2 years; in the middle-aged and maturing stand it was 4.3—4.8 years. In case of a pitch pine tree or in pines in a depressed state resulting from anthropogenic flooding, the needle longevity decreased. The needle longevity increased in pines growing near drainage ditches but in pines growing in the interditch space it remained at the level characteristic for a natural forest. The effect of recreation on the duration of needles retention in the crown depended on the stage of digression. A decrease the needle longevity was noted at the III stage of digression. Needle longevity is conditioned by the tree ability to withstand a stressful factor. Consequently, longer needle longevity is associated with the mechanism

of tree adaptation to external influences. The needles mortality in trees of older ages is due to their inability to adapt to the negative environmental effects.

**Keywords:** needle longevity; forest growing conditions; pine; raised water table; drainage; recreation

---

## 1. Введение

Эффективное управление качеством и состоянием насаждений строится как на характеристиках оптимальности условий произрастания, так и на критериях адаптационных способностей деревьев [1], [2]. В связи с этим остаётся актуальным изучение стрессовых факторов, ограничивающих реализацию потенциальных возможностей растений, и реакций растений на них [3], [4]. Чувствительным индикатором благополучности условий произрастания и адаптационных способностей древесных растений является срок жизнедеятельности ассимиляционного аппарата, определяющий успешность их роста, развития, жизнеспособности и продуктивности [5], [6]. Однако информация о продолжительности жизни хвои и влиянии на неё различных факторов противоречива. Так, противоположные мнения о влиянии высоты и диаметра деревьев на продолжительность жизни хвои отмечаются в ряде работ [7], [8]. Долголетие хвои обусловлено географическими областями и почвенными условиями [9—11]. Однако в европейской тайге в схожих лесорастительных условиях хвоя сосны держится от 2—3 до 9—10 лет. Факторы, снижающие интенсивность фотосинтеза, способствуют увеличению продолжительности жизни хвои [7], [12], но и в благоприятных условиях произрастания долголетие хвои возрастает [13]. Расхождение мнений относительно влияния условий местопроизрастания на продолжительность жизни хвои обусловлено видом стрессового фактора. Так, под влиянием биологического фактора часть ассимиляционного аппарата уничтожается, в результате для поддержания физиологических процессов у деревьев возрастает длительность удержания игл старшего возраста [6], что обусловлено увеличением их освещённости и, как следствие, интенсивностью фотосинтеза. При аэрогенном загрязнении происходит снижение фотосинтеза за счёт нарушений в пигментном комплексе, уменьшения фотосинтезирующей поверхности в результате некроза хлоренхимы, что приводит к дефолиации хвои старших возрастов [14]. Независимо от вида повреждающего фактора при снижении жизненного состояния долговечность хвои сокращается [5], [15].

Для использования продолжительности жизни хвои в качестве критерия оценки состояния хвойных древесных растений, которая в значительной мере отражает влияние внешних условий среды [5], как критерий благополучности условий произрастания необходимо выявление стандартного периода удержания хвои деревом, характерного для конкретного региона [8], [13].

## 2. Материалы и методы

Цель исследования — оценка продолжительности жизни хвои сосны в различных условиях произрастания. Объектами исследования являлись сосняки лишайниковые, брусличные, черничные, кустарничково-сфагновые осушенные, осоково-сфагновые, кустарничково-сфагновые, сосна по болоту в северо-таёжном и южно-таёжном лесорастительных районах (таблица 1). Пробные площади № 10—15 заложены в сосняках

кустарничково-сфагновых осущенных в 1969 г. Расстояние между осушителями 110 м. На пробной площади № 16 отмечается высокая рекреационная нагрузка — количество рекреантов от 25 до 30 чел. на гектар, площадь территории, лишенной напочвенного покрова, составляет 76 % от всей площади. Пробная площадь № 17 характеризуется средней рекреационной нагрузкой — количество рекреантов составляет от 10 до 15 чел. на гектар; площадь вытоптанной территории составляет 28 %. Пробная площадь № 18 характеризуется слабой рекреационной нагрузкой — количество рекреантов до 3 чел. на гектар, нарушенности напочвенного покрова не наблюдается. На пробных площадях № 19—22 рассматривается влияние сезонного подтопления на сосняки осоково-сфагновые. В связи с прокладкой дороги и нарушением стока грунтовых вод (сток происходит, но затруднён) на пробных площадях № 20 и № 22 отмечается сезонное подтопление, что приводит к сильному ослаблению и даже усыханию деревьев. Дехромация кроны составляет 30—50 %. Пробные площади № 19 и № 21 находятся в стороне, негативного влияния дороги не наблюдается.

**Таблица 1.** Таксационная характеристика насаждений

**Table 1.** Taxation characteristics of plantings

№ п/п	Тип леса	Состав	Средние		Возраст, лет	Густота, шт./га
			диаметр, см	высота, м		
Северо-таёжный лесной район						
1	Сосна по болоту	10C	4,6	4,5	62	-
2	Сосняк кустарничково-сфагновый	10C + Б	9,1	8,4	65	2258
3	Сосняк чернично-сфагновый	9C1Б	12,5	11,8	67	1637
4	Сосняк черничный	9C1Б	14,2	12	70	1432
5	Сосняк черничный	9C1Б	16,5	16,3	70	1113
6	Сосняк брусничный	10C	13	15	65	2338
7	Сосняк лишайниковый	10C	10,3	11,2	68	3025
8	Сосняк черничный	10C	7,0	4,8	17	2500
9	Посадки на набережной г. Архангельска	10c	10,7	4,4	20	985
Вблизи осушителя						
10	Сосняк кустарничково-сфагновый осушённый	10C + Б	9,0	8,1	45	1451
11			8,3	8,0	45	2885
12			6,2	6,7	45	6297

13	Сосняк кустарничково-сфагновый осушенный	10С + Б	6,9	6,4	45	1873
14			6,1	5,5	45	3842
15			5,4	5,6	45	7867
Рекреационные насаждения						
16	Сосняк черничный	10С	17,5	17,1	92	412
17		10С1Б	18,7	17,5	92	976
18		10С1Б	21,2	18,6	92	1362
Влияние подтопления						
19	Сосняк осоково-сфагновый	10С + Б	13,6	11,9	71	1177
20		10С + Б	12,6	10,9	65	1248
21		10С + Б	12,3	10,5	60	1520
22		10С + Б	12,3	10,6	57	1636
Соловецкие острова						
23	Сосняк черничный	10С	6,6	4,4	17	2650
Южно-таёжный лесорастительный район						
24	Сосняк лишайниковый	10С	3,4	4,1	20	3941
25	Сосняк брусничный	10С	4,1	6,0	20	3482
26	Сосняк черничный	10Сед.Б	6,3	6,8	20	3462

На пробной площади выбирали модельные деревья (15 шт.) пропорционально представленности по ступеням толщины. Средняя продолжительность жизни хвои на дереве оценивалась по трём модельным ветвям в средней части кроны. Образцы хвои отбирали во всех возрастных категориях по 10 шт. Определяли среднюю длину, ширину, толщину, площадь хвоинки, количество хвои на ветви, количество ветвей в кроне. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ MS Excel 2000, SPSS.

### 3. Результаты

При продвижении на север значимого изменения средней продолжительности жизни хвои культур сосны в возрасте около 20 лет не происходит (таблица 2). И в суровых условиях Соловецких островов, и в южной подзоне тайги у большинства молодых деревьев продолжительность жизни хвои составляет три года. Но в северной подзоне тайги уже в 20-летнем насаждении отмечается пятилетняя хвоя. Появление деревьев с пятилетней хвойой может указывать на процесс адаптации их к неблагоприятным факторам, например, к низким температурам воздуха. Рассматривая корреляции продолжительности жизни хвои молодых сосен от морфометрических характеристик деревьев, ассимиляционного аппарата, отмечается умеренная обратная связь с длиной, шириной, толщиной и площадью хвоинки ( $r = -0,34 \dots -0,53$  при  $t = 4,1 \dots 4,6$ ); от умеренной до высокой — связь с количеством хвои

и количеством ветвей ( $r = 0,38—0,83$  при  $t = 4,2—8,4$ ). Прямая зависимость продолжительности жизни хвои от количества ветвей и количества хвои на ветви указывает на повышение конкурентной способности за счёт удержания хвои старшего возраста. Это характерно для данного возраста и обуславливает процесс дифференциации деревьев. Так как все силы уходят на конкурентную борьбу, то на данном этапе это не отражается на диаметре и приросте молодого дерева. Но уже в 40-летнем возрасте отмечается умеренная зависимость продолжительности жизни хвои от диаметра и высоты дерева ( $r = 0,39—0,44$  при  $t = 4,2$ ).

**Таблица 2.** Продолжительность жизни хвои в 20-летних сосняках черничных

**Table 2.** Needle longevity in 20-year-old blueberry pine forests

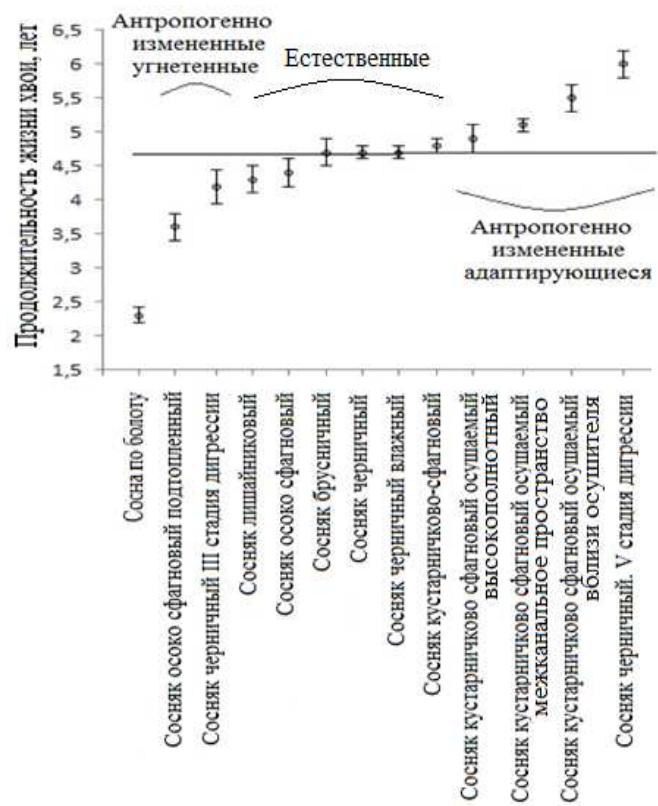
Лесорастительный район	Лесничество	Продолжительность жизни хвои, лет	
		средняя с ошибкой	минимальная — максимальная
Южно-таёжный	Устюженское	$3,1 \pm 0,1$	3—4
Северо-таёжный	Луковецкое	$3,2 \pm 0,1$	2—5
Северо-таёжный	г. Архангельск	$4,0 \pm 0,2$	3—5
Северо-таёжный	Соловецкое	$3,4 \pm 0,1$	3—5

Стабильность в средней продолжительности жизни хвои при изменении типа леса, лесорастительной зоны указывает на оптимальное значение данного показателя для этой возрастной группы (20-летнее насаждение — средняя продолжительность жизни хвои 3,2 года).

Отмечается значимое повышение средней продолжительности жизни хвои молодых сосен в условиях города (набережная) по сравнению с лесной территорией (таблица 2). В многочисленных литературных источниках указывается, что продолжительность жизни хвои в условиях города сокращается. Но сокращается она не у молодых деревьев. Молодые деревья с активным потенциалом роста хорошо приспособливаются к условиям среды, в них ещё не произошёл накопительный эффект токсикантов. В нашем примере рассматриваются не отдельные деревья, а многорядные посадки. В результате поверхность соприкосновения с негативным фактором, прежде всего атмосферное загрязнение воздуха, ниже по сравнению с отдельными деревьями.

В средневозрастных, приспевающих сосняках северной подзоны тайги, не подверженных антропогенному фактору, в различных лесорастительных условиях средняя продолжительность жизни хвои составляет 4,3—4,8 года (рисунок). В насаждениях встречаются, в основном, деревья с четырёхлетней хвоей (26—67 %) и пятилетней хвоей (26—80 %). Следовательно, для сосны стандартным периодом удержания хвои является 4—5 лет.

Сокращение продолжительности жизни хвои отмечается у сосны, произрастающей на болоте. Длительность удержания хвои в кроне составляет 2,3 года. За счёт того, что в кроне присутствует, в основном, только хвоя первых двух лет, масса хвои на ветви и в кроне сокращается, по сравнению с сосняками избыточно-увлажнёнными, в четыре раза. Изреживание кроны указывает на угнетённое состояние деревьев, вызванное слабым развитием корневой системы вследствие высоких уровней грунтовых вод. В данных условиях корни могут существовать только в микроповышениях. Сокращение срока жизнедеятельности хвои отмечается и при подтоплении сосняков осоково-сфагновых, происходящем после прокладки дороги. В результате нарушения стока воды в начале вегетационного периода складываются неблагоприятные условия для корней деревьев, характеризующиеся недостатком кислорода в почвенной воде, накоплением токсичных для корней веществ. В данных условиях продолжительность жизни хвои сократилась на 16 % по сравнению с нативными сосняками осоково-сфагновыми ( $t = 3,0$  при  $t_{st} = 2,8$  вероятность безошибочного заключения 0,99). Основную долю в древостое составляют деревья с долговечностью хвои три года. Угнетение деревьев также проявилось в дехромации кроны от 30 до 50 %.



**Рисунок.** Продолжительность жизни хвои сосны в естественных и антропогенно изменённых насаждениях

**Figure.** Pine needle longevity in natural and anthropogenic plantations

На изменение продолжительности жизни хвои повлияло повышение рекреационной нагрузки в сосновых насаждениях. Активное посещение населением насаждений приводит к уплотнению почв и, как следствие, к ухудшению их газообмена и водоснабжения. Сокращение длительности удержания хвои на 11 % отмечается при средней рекреационной нагрузке. Треть деревьев в древостое характеризуется продолжительностью жизни хвои три года. Но уже при высокой рекреационной нагрузке средняя продолжительность жизни хвои возросла до шести лет, встречаются деревья с 7-летней и 8-летней хвойю. Повышение продолжительности жизни хвои при высокой рекреационной нагрузке происходит в результате отпада деревьев, которые не смогли адаптироваться к изменившимся условиям произрастания. Сила влияния рекреационной нагрузки на продолжительность жизни хвои умеренная:  $\eta^2 = 0,45$ , критерии Фишера  $F = 29,5$  при уровне значимости 0,05  $F_{st} = 2,7$ .

Повышение продолжительности жизни хвои отмечается в осушаемых насаждениях вблизи осушительного канала. Возраст хвои здесь составляет от пяти до шести лет, единично встречается 7-летняя и 8-летняя хвоя. В межканальном пространстве продолжительность жизни хвои сохраняется на уровне нативных сосняков кустарничково-сфагновых. Межканальное пространство при расстоянии между осушителями 110 м относится к недостаточно осушенному, изменений уровня грунтовых вод в течение вегетационного периода кардинально не происходит. Вблизи осушителя деревья вынуждены приспособливаться к значительным колебаниям грунтовых вод в течение вегетационного периода, с пересыханием верхних слоёв торфа в июле. Адаптационным процессам деревьев в данных условиях способствует боковое освещение со стороны осушителя. Сила влияния осушения на продолжительность жизни хвои слабая:  $\eta^2 = 0,23$ , критерии Фишера  $F = 26,1$  при уровне значимости 0,05  $F_{st} = 3,9$ . Влияния густоты древостоя на продолжительность жизни хвои не выявлено. Однако при очень высокой густоте древостоя (около 7000 шт./га) средняя продолжительность жизни хвои вблизи осушителя находится на уровне межканального пространства.

#### 4. Заключение

Продолжительность жизни хвои — достаточно стабильный показатель. В молодняках она составляет от трёх до четырёх лет, в средневозрастных насаждениях — от четырёх до пяти лет. Продолжительность жизни хвои обусловлена способностью противостоять стрессовому фактору. Механизмом адаптации деревьев к внешнему воздействию является увеличение продолжительности жизни хвои. Отпад хвои старших возрастов обусловлен неспособностью адаптироваться к негативному воздействию.

#### Список литературы

1. Wortley L., Hero J., Howes M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature // Restoration Ecology. 2013. Vol. 21. P. 537—543. DOI: 10.1111/rec.12028.

2. Fire and tree death: understanding and improving modeling of fire induced tree mortality / S. M. Hood, J. M. Varner, P. van Mantgem [et al.] // Environmental Research Letters. 2018. Vol. 13. P. 113004. DOI: 10.1088/1748-9326/aae934.
3. Abiotic stressors and stress responses: What commonalities appear between species across biological organization levels? / C. Sulmon, J. Baaren, F. Cabello-Hurtad [et al.] // Environmental Pollution. 2015. Vol. 202. P. 66—77. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.03.013.
4. Влияние теплового стресса на ассимиляционный аппарат хвои сосны обыкновенной в послепожарных сосновых Южной Сибири / И. Г. Гетте, И. В. Косов, Н. В. Пахарькова [и др.] // Лесоведение. 2017. № 6. С. 437—445. DOI: 10.7868/S0024114817060067.
5. Путенихина К. В., Путенихин В. П. Продолжительность жизни хвои у кедра сибирского при интродукции в Башкирском Предуралье и на Южном Урале // Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы: Сб. ст. XVII Междунар. научно-практич. конф. Пенза, 2022. С. 158—161.
6. Doran O., MacLean D. A., Kershaw J. A. Needle longevity of balsam fir is increased by defoliation by spruce budworm // Trees-Structure and Function. 2017. Vol. 31, no. 6. P. 1933—1944. DOI: 10.1007/s00468-017-1597-4.
7. Феклистов П. А., Соболев А. Н. Лесные насаждения Соловецкого архипелага (структура, состояние, рост). Архангельск, 2010. 201 с.
8. The effect of within-stand variation in Swiss needle cast intensity on Douglas-fir stand dynamics / J. H. Zhao, D. A. Maguire, D. B. Mainwaring [et al.] // Forest Ecology and Management. 2015. Vol. 347. P. 75—82. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.03.010.
9. Кузьмин С. Р., Карпюк Т. В. Продолжительность жизни хвои у климатипов сосны обыкновенной в географических культурах в Красноярском крае // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: Материалы междунар. научно-практич. конф., посвящённой 70-летию ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ». Красноярск, 2022. С. 330—332.
10. Моллаева М. З. Морфометрические параметры ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в горах Центрального Кавказа // Лесоведение. 2021. № 4. С. 406—414.
11. Cold adaptation drives variability in needle structure and anatomy in *Pinus sylvestris* L. along a 1,900 km temperate-boreal transect / A. Jankowski, T. P. Wyka, R. Zytkowiak [et al.] // Functional Ecology. 2017. Vol. 201731. P. 2212—2223. DOI: 10.1111/1365-2435.12946.
12. Gan S., Amasino R. M. Making sense of senescence: molecular genetic regulation and manipulation of leaf senescence // Plant Physiol. 1997. Vol. 113. P. 313—319. DOI: 10.1104/pp.115.1.313.
13. Assessment of *Pinus sylvestris* L. tree health in urban forests at highway sides in Lithuania / V. Stravinskienė, E. Bartkevičius, J. Abraitienė [et al.] // Global Ecology and Conservation. 2018. Vol. 16. P. 1—16. DOI: 10.1016/j.gecco.2018.e00517.
14. Феклистов П. А., Тутыгин Г. С., Дрожжин Д. П. Состояние сосновых древостоев в условиях аэробиотехногенного загрязнения атмосферы. Архангельск: АГТУ, 2005. 132 с.
15. Ярмишико В. Т., Игнатьева О. В., Евдокимов А. С. Некоторые аспекты мониторинга сосновых лесов в экстремальных условиях Кольского Севера // Самарский научный вестник. 2019. Т. 8, № 2 (27). С. 81—86.

## References

1. Wortley L., Hero J., Howes M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restoration Ecology*, 2013, vol. 21, pp. 537—543. doi: 10.1111/rec.12028.

2. Hood S. M., Varner J. M., van Mantgem P., Cansler C. A. Fire and tree death: understanding and improving modeling of fire induced tree mortality. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, pp. 113004. doi: 10.1088/1748-9326/aae934.
3. Sulmon C., Baaren J., Cabello-Hurtad F., Gouesbet G. Abiotic stressors and stress responses: What commonalities appear between species across biological organization levels? *Environmental Pollution*, 2015, vol. 202, pp. 66—77. doi: 10.1016/j.envpol.2015.03.013.
4. Goethe I. G., Kosov I. V., Pakharkova N. V., Bezkorovaynaya I. N. The effect of heat stress on the assimilation apparatus of pine needles in the post-fire pine forests of Southern Siberia. *Forest science*, 2017, no. 6, pp. 437—445. doi: 10.7868/S0024114817060067 (In Russ.)
5. Putenikhina K. V., Putenikhin V. P. The life expectancy of needles in Siberian cedar during introduction in the Bashkir Urals and the Southern Urals. *Agro-industrial complex: state, problems, prospects. Collection of articles of the XVII International Scientific and Practical Conference*. Penza, 2022, pp. 158—161. (In Russ.)
6. Doran O., MacLean D. A., Kershaw J. A. Needle longevity of balsam fir is increased by defoliation by spruce budworm. *Trees-Structure and Function*, 2017, vol. 31, no. 6, pp. 1933—1944. doi:10.1007/s00468-017-1597-4.
7. Feklistov P. A., Sobolev A. N. Forest plantations of the Solovetsky archipelago (structure, condition, growth). Arkhangelsk, 2010. 201 p. (In Russ.)
8. Zhao J. H., Maguire D. A., Mainwaring D. B., Kanaskie A. The effect of within-stand variation in Swiss needle cast intensity on Douglas-fir stand dynamics. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 347, pp. 75—82. doi: 10.1016/j.foreco.2015.03.010.
9. Kuzmin S. R., Karpyuk T. V. The pine needle longevity in the climatypes of the common pine in geographical cultures in the Krasnoyarsk Territory. *Science and Education: experience, problems, development prospects. Materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 70<sup>th</sup> anniversary of the Krasnoyarsk State Agrarian University*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 330—332. (In Russ.)
10. Mollaeva M. Z. Morphometric parameters of the assimilation apparatus of scots pine in the mountains of the Central Caucasus. *Forest science*, 2021, no. 4, pp. 406—414. (In Russ.)
11. Jankowski A., Wyka T. P., Zytkowiak R., Nihlgård B., Reich P. B., Oleksyn J. Cold adaptation drives variability in needle structure and anatomy in *Pinus sylvestris* L. along a 1,900 km temperate-boreal transect. *Functional Ecology*, 2017, vol. 201731, pp. 2212—2223. doi: 10.1111/1365-2435.12946.
12. Gan S., Amasino R. M. Making sense of senescence: molecular genetic regulation and manipulation of leaf senescence. *Plant Physiol*, 1997, vol. 113, pp. 313—319. doi: 10.1104/pp.115.1.313.
13. Stravinskiene V., Bartkevicius E., Abraiteiene J., Dautarte A. Assessment of *Pinus sylvestris* L. tree health in urban forests at highway sides in Lithuania. *Global Ecology and Conservation*, 2018, vol. 16, pp. 1—16. doi: 10.1016/j.gecco.2018.e00517.
14. Feklistov P. A., Tutygin G. S., Drozhzhin D. P. The state of pine stands in conditions of aerotechnogenic atmospheric pollution. Arkhangelsk, ASTU, 2005. 132 p. (In Russ.)
15. Yarmishko V. T., Ignatjeva O. V., Evdokimov A. S. Some aspects of monitoring pine forests in extreme conditions of the Kola North. *Samara Scientific Bulletin*, 2019, vol. 8, no. 2 (27), pp. 81—86. (In Russ.)

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7163

УДК 630.2:502.05

*Статья*

## **Использование беспилотного летательного аппарата для оценки процесса формирования молодняков на вырубках**

**Ольхин Юрий Васильевич**

*кандидат биологических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), olkhin@petrsu.ru*

**Гавrilova Ольга Ивановна**

*доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), ogavril@petrsu.ru*

**Грязькин Анатолий Васильевич**

*доктор биологических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), lesovod@bk.ru*

*Получена: 17 мая 2023 / Принята: 14 сентября 2023 / Опубликована: 27 сентября 2023*

---

**Аннотация:** Представлены материалы по использованию беспилотного летательного аппарата для оценки состояния молодняков на вырубках с оставленными куртинами семенных деревьев. Для получения аэрофотоснимков применялся беспилотный авиационный комплекс самолётного типа. Аэрофотосъёмка проводилась в видимом диапазоне (RGB) и видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (RED, REG, GRE, NIR). Пространственное разрешение в видимом диапазоне составило менее 5 см, в видимом и ближнем инфракрасном — 19 см. Использование беспилотного летательного аппарата и мультиспектральных снимков позволило оценить состояние и структуру молодняков на вырубке 8-летней давности с созданными лесными культурами сосны обыкновенной. На ортофотоплане отчётливо видны ряды лесных культур и примеси хвойных и лиственных пород естественного происхождения, как в рядах, так и в междуурядьях. Определён состав молодняков, сформировавшихся на опытных участках, и состав древостоя в оставленных куртинах. Сосна обыкновенная дешифрируется по округлой форме и относительно равномерной, мелкозернистой текстуре проекции кроны, а также тени в форме полумесяца или полукольца, что обусловлено шаровидной

или параболоидной формой кроны с закруглённой вершиной. Ель дешифрируется звёздчатым рисунком проекции кроны и тенью в виде полукруга и треугольника, что обусловлено конусовидной формой кроны. Мультиспектральный анализ изображения позволяет идентифицировать ель европейскую по зеленовато-голубому цвету. Лиственные деревья на мультиспектральных изображениях имеют жёлто-зелёный, жёлто-оранжевый, красноватый оттенок проекций крон. Для изображения берёзы бородавчатой характерна округлая форма проекции кроны с неровным краем, среднезернистая или комковатая текстура за счёт распределения затенённых и освещённых участков в кроне дерева. Благодаря высокому пространственному разрешению снимков с беспилотного летательного аппарата, на наклонных проекциях деревьев в видимом диапазоне берёза заметна по белому цвету ствола. С использованием специальных программ определены численность деревьев по породам и даже биометрические характеристики отдельных растений. Полученные материалы целесообразно использовать при разработке нормативных документов и планировании лесохозяйственных работ.

**Ключевые слова:** методы оценки; беспилотный летательный аппарат; сосна обыкновенная; естественное восстановление леса

---

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7163

Article

## The use of unmanned aerial vehicles to assess young trees formation in clean cutting areas

**Yuri Olkhin**

*PhD in biology, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
olkhin@petrsu.ru*

**Olga Gavrilova**

*D. Sc. in agriculture, professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
ogavril@petrsu.ru*

**Anatoliy Gryazkin**

*D. Sc. in biology, professor, Saint Petersburg State Forest Technical University  
named after S. M. Kirov (Russian Federation), lesovod@bk.ru*

*Received: 17 May 2023 / Accepted: 14 September 2023 / Published: 27 September 2023*

---

**Abstract:** The article presents information on the use of an unmanned aerial vehicle to assess young trees state in seed blocks. An unmanned aircraft complex of an airplane type was used to obtain aerial photographs. Aerial photography was carried out in the visible range (RGB) and the visible and near infrared ranges (RED, REG, GRE, NIR). The spatial resolution in the visible range was less than 5 cm, in the visible and near infrared – 19 cm. The use of an unmanned aerial vehicle and multispectral images allowed assessing the condition and structure of young trees at the cutting of 8 years ago with the created forest crops of scots pine. On the orthophotoplane, rows of forest crops and admixtures of coniferous and deciduous species of natural origin are clearly visible both in the rows and in the inter-row spacing. The compositions of the young trees formed on the experimental plots and that of the stands in the seed blocks were determined. The Scotch pine was deciphered by the rounded shape and relatively uniform, fine-grained texture of the crown projection, as well as the shadow in the form of a crescent or half-ring, which is due to the spherical or paraboloid shape of the crown with a rounded top. Spruce was deciphered by a star-shaped crown projection pattern and a shadow in the form of a semicircle and a triangle, which is due to the cone-shaped shape of the crown. Multispectral image analysis allowed identifying the European spruce by its greenish-blue color. Deciduous trees in multispectral images had yellow-green, yellow-orange, reddish shade of crown projections. The image of the warty birch

was characterized by the rounded shape of the crown projection with an uneven edge, medium-grained or lumpy texture due to the distribution of shaded and illuminated areas in the crown of the tree. Due to the high spatial resolution of images from an unmanned aerial vehicle on inclined projections of trees in the visible range, the birch was noticeable by the white color of the trunk. Using special programs, the number of trees by species was determined, and even so the biometric characteristics of individual plants. It is advisable to use the obtained materials in the development of regulatory documents and planning of forestry work.

**Keywords:** assessment methods; unmanned aerial vehicle; scots pine; natural forest restoration

---

## 1. Введение

Практический опыт лесовосстановительных работ в условиях таёжной зоны показывает, что в большинстве случаев на вырубках, особенно по сухим бедным почвам, естественное возобновление сосной протекает успешно [1], [2]. Особенno это актуально при проведении мер содействия на вырубке, в виде оставленных семенных куртин и минерализации почвы [3], [4]. По этой причине создание лесных культур в данных условиях может быть не всегда целесообразно.

В самых распространённых на территории Республики Карелия сосновых брусничных и черничных, если расстояние рассеивания семян позволяет, что обеспечивается оптимальной шириной вырубки, лесовосстановление обеспечивается естественно появившимся самосевом. Однако при несвоевременном проведении рубок ухода за составом в течение первых 10—20 лет он может погибать под кронами лиственных насаждений. На участках по относительно богатым типам почв (травяные и кисличные типы леса) рекомендуется проведение обработки почвы для устранения влияния, в основном, злаковой растительности. Ряд авторов отмечают [5], [6], что при сплошных рубках не всегда соблюдали Правила лесовосстановления и возобновление хвойных пород не обеспечивалось. Отмечается, кроме того, высокая ветровальность семенных деревьев и куртин в течение первых трёх лет, которые связывают с недостаточной устойчивостью корневых систем в результате отсутствия мероприятий по уходу за лесом [7], [8]. В целях повышения ветроустойчивости вместо отдельных деревьев для сосны и ели рекомендовано оставлять семенные куртины [8].

Известно, что искусственное лесовосстановление относится к плановым мероприятиям с заранее утверждённым объёмом. В этой связи при отсутствии оптимальных площадей лесокультурного фонда для создания лесных культур используются любые категории непокрытых лесом земель, включая вырубки на сухих бедных почвах после рубки сосновых [9]. Такие способы лесовосстановления приводят к нерациональному использованию выделенных материальных и денежных средств [10].

Естественное возобновление — единственный способ восстановления лесных формаций в историческом прошлом [2]. Такой способ восстановления лесов практиковался и практикуется, в основном, в зоне таёжных лесов. Нередко естественное возобновление бывает весьма успешным, численность подроста может достигать в отдельных случаях до 40 тыс. экз./га [11]. Обилие самосева хвойных пород отмечается исследователями, как правило, на сухих бедных почвах.

Оценка состояния лесовозобновления на вырубках на основе материалов, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), является перспективным инструментом для современного мониторинга состояния лесовосстановительных работ [12—18]. Высокое пространственное разрешение снимков БПЛА повышает качество дешифрирования объектов

лесного фонда, позволяет выявлять породный состав, таксационные характеристики насаждений, наличие заболеваний у древесных растений [19—22].

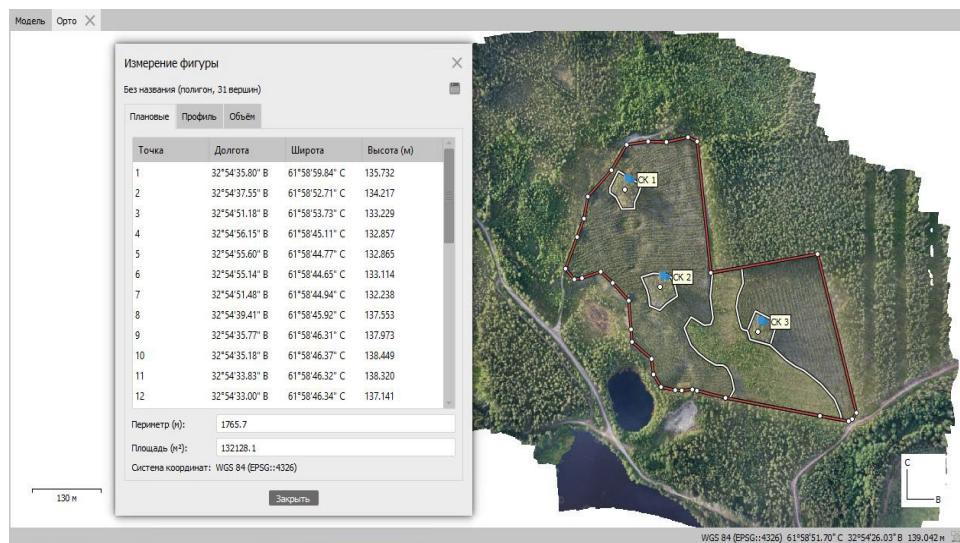
Цель исследования — оценка успешности лесовосстановления на вырубках с использованием материалов, полученных с беспилотных летательных аппаратов.

## 2. Материалы и методы

Для оценки состояния лесовосстановления были использованы данные, полученные с помощью беспилотной авиационной системы. Аэрофотосъёмка части территории, представляющая часть лесных насаждений, вырубок, семенных куртин и лесных культур, была проведена БПЛА с жёстким крылом, высота полёта составила около 200 м. Съёмочные работы выполнялись 29—30 июня 2020 г.

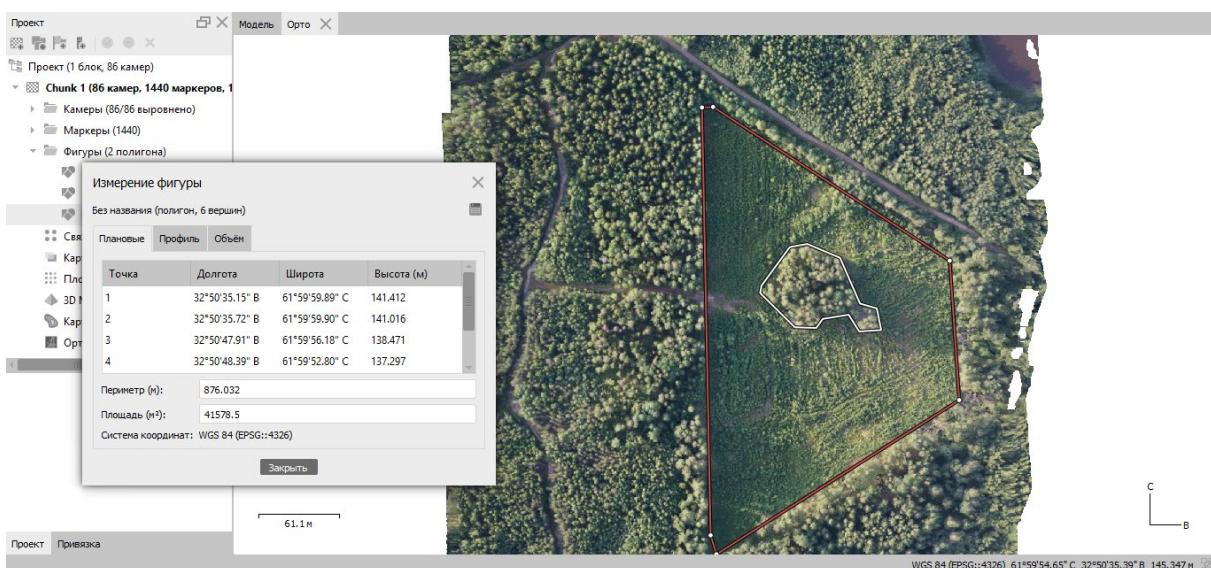
Исследуемые объекты находятся в кварталах 82 и 96 лесного фонда Вешкельского лесничества в Суоярвском районе Республики Карелия. Общая площадь, охваченная аэрофотосъёмкой, составляет 1000 га. В представленном исследовании сделана оценка части территории, а именно вырубка 2014 г., ряд примыкающих насаждений, семенные куртины и лесные культуры сосны обыкновенной 8-летнего возраста (рисунок 1 — объект 1, рисунок 2 — объект 2).

Для проведения аэрофотосъёмки использовались камеры SONY DSC-RX1R с видимым диапазоном (RGB) и Parrot Sequoia с видимым и ближним инфракрасным диапазоном (RED, REG, GRE, NIR). В видимом диапазоне пространственное разрешение снимков составило менее 5 см, в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне — 19 см.



**Рисунок 1.** Контуры вырубки, семенных куртин и лесные культуры сосны обыкновенной на объекте 1 (СК-1, СК-2, СК-3 — семенные куртины)

**Figure 1.** Contours of clean cutting, seed trees and artificial reforestation of scots pine at object 1 (CK-1, CK-2, CK-3 — seed blocks)



**Рисунок 2.** Контуры вырубки и семенной куртины на объекте 2

**Figure 2.** Contours of clean cutting and seed blocks in object 2

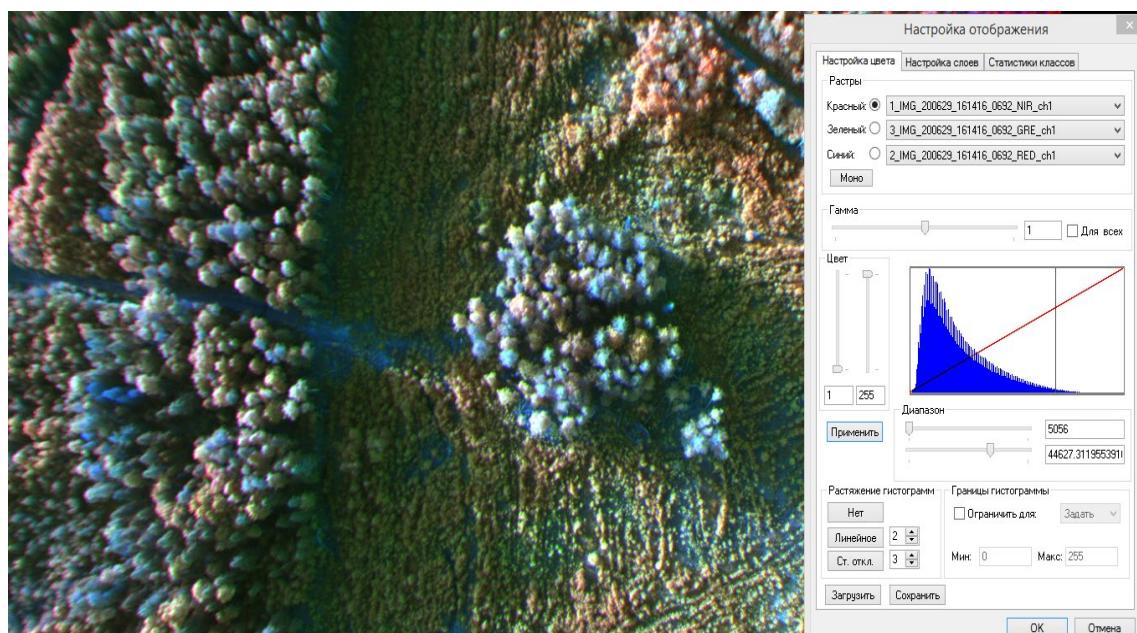
Для обработки материалов аэрофотосъёмки использовалось современное фотограмметрическое программное обеспечение Agisoft Metashape Professional. Был выполнен процесс загрузки и выравнивания (фототриангуляции) снимков, привязки снимков, построения плотного облака точек, классификации облака точек, создания 3D-модели, карт высот и ортофотоплана. В качестве системы координат была применена WGS 84. Пространственное разрешение полученного ортофотоплана составило 4,84 см/пиксель. Дополнительно для анализа мультиспектральных изображений было использовано программное обеспечение Scanex Image Processor.

### 3. Результаты

Ортофотоплан с высоким пространственным разрешением способствует точному определению рядов и междуурядий в лесных культурах, а также позволяет различить проекции крон саженцев, идентифицировать проекции крон деревьев в семенных куртинах и стволы упавших деревьев.

На рисунке 3 представлено синтезированное мультиспектральное изображение NIR-GRE-RED лесных культур сосны обыкновенной и семенной куртины на объекте 2. По преобладающему красно-оранжевому цвету хорошо дешифрируются лиственные породы на площади стен леса, окружающей вырубку. При этом заметны ряды лесных культур, которые начали смыкаться в рядах, что свидетельствует о достаточной сохранности культур. Кроме того, в рядах и междуурядьях культур после 8 лет наблюдаем интенсивное зарастание вырубки видами живого напочвенного покрова, интенсивный жёлто-оранжевый фон свидетельствует как раз об этом. Участки минерализованной почвы и дорог хорошо

распознаются по серовато-синему тону. На площади вырубки отмечается большое количество возобновления лиственных пород, источником которых являются стены леса, примыкающие к вырубке. Таким образом, для объекта 2 характерно большое количество примеси лиственных пород к созданным культурам сосны обыкновенной, что предполагает в ближайшее время проведение уходов за составом молодняка.

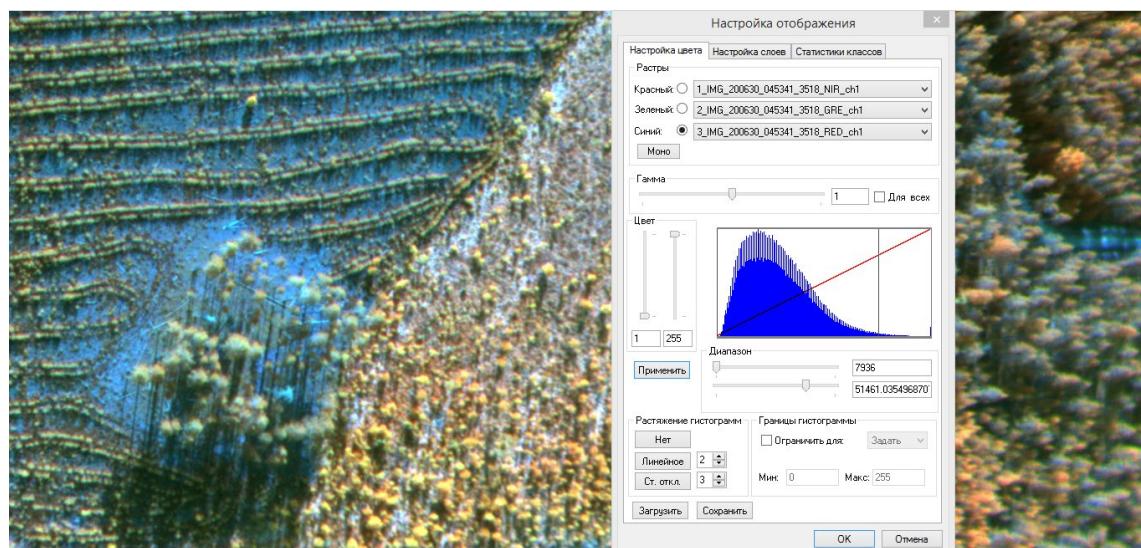


**Рисунок 3.** Мультиспектральное синтезированное изображение NIR-GRE-RED вырубки с семенной куртиной и рядами лесных культур сосны обыкновенной

**Figure 3.** Multispectral synthesized image of a NIR-GRE-RED clean cutting with a seed blocks and rows of artificial reforestation of scots pine

На рисунке 4 представлено синтезированное мультиспектральное изображение NIR-GRE-RED лесных культур сосны обыкновенной и семенной куртины на объекте 1. По светлому зеленовато-серому цвету дешифрируются проекции крон сосны. Лиственные породы имеют более яркий желтоватый оттенок.

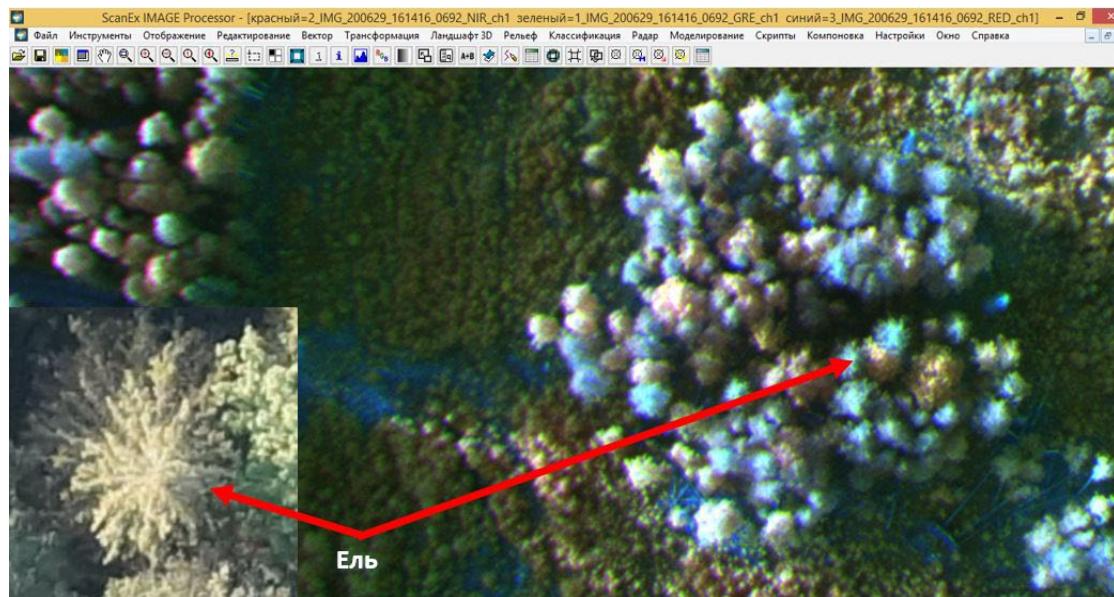
Данные с БПЛА способствуют распознаванию растений благодаря сверхвысокому пространственному разрешению. На вырубке в семенных куртинах хорошо идентифицируются лесообразующие породы по спектральным и геометрическим характеристикам. Оценка дешифровочных признаков, таких как цвет, форма проекции кроны, текстура, собственная и падающая тени, даёт возможность выявить древесные породы.



**Рисунок 4.** Мультиспектральное синтезированное изображение NIR-GRE-RED фрагмента вырубки на объекте 1 с семенной куртиной (СК-3) и рядами лесных культур сосны обыкновенной

**Figure 4.** Multispectral synthesized image of a NIR-GRE-RED fragment of clean cutting in object 1 with a seed blocks (CK-3) and rows of artificial reforestation of scots pine

На изображениях, полученных с помощью БПЛА (рисунок 5), хорошо различимы форма и радиальная текстура проекции кроны ели европейской.

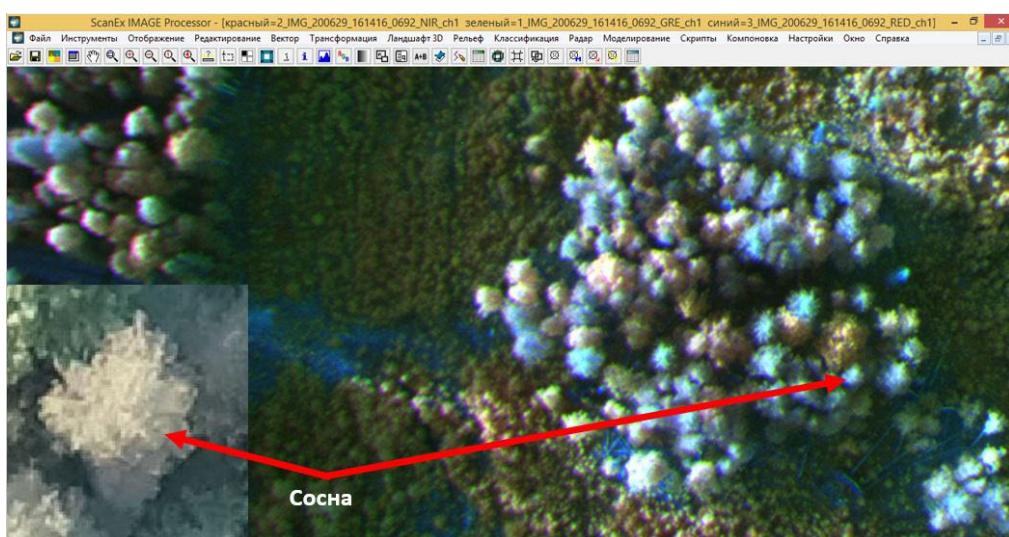


**Рисунок 5.** Спектральные и геометрические характеристики ели европейской в семенной куртине

**Figure 5.** Spectral and geometric characteristics of european spruce in a seed blocks

Особенности ветвления ели способствуют формированию звёздчатого рисунка проекций крон на снимках. Собственная тень имеет вид полукруга и треугольника, что обусловлено конусовидной формой кроны. Мультиспектральный анализ изображения позволяет идентифицировать ель европейскую по зеленовато-голубому цвету.

Сосна обыкновенная дешифрируется по округлой форме и относительно равномерной, мелкозернистой текстуре проекции кроны. Зернистость образуется за счёт распределения освещённых и затенённых участков в кроне. Собственная тень воспринимается как полумесец или полукольцо, что обусловлено шаровидной или параболоидной формой кроны с закруглённой вершиной. В представленном мультиспектральном синтезе проекции крон сосны имеют светлый голубоватый оттенок (рисунок 6).



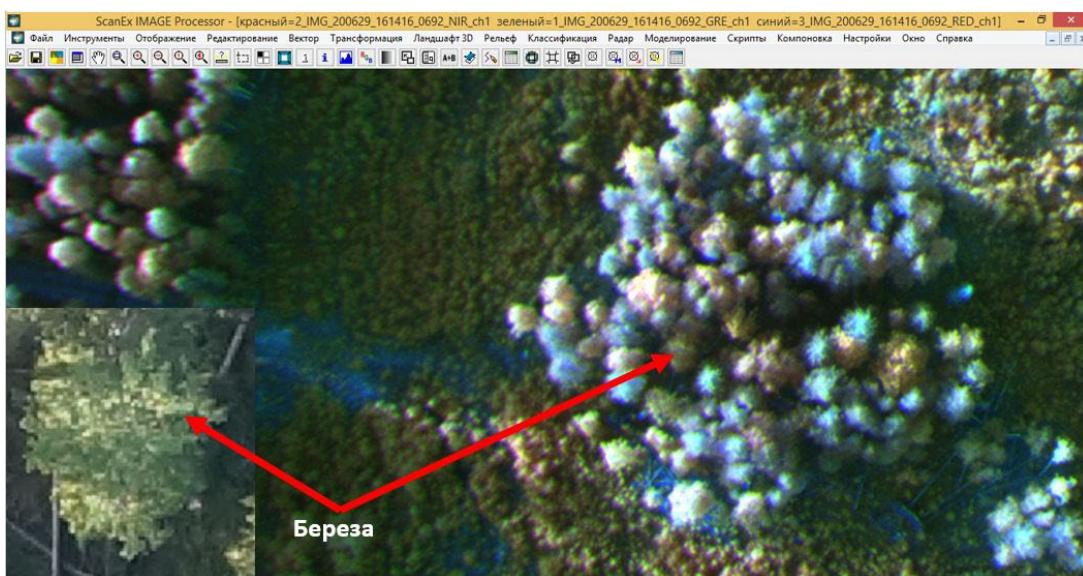
**Рисунок 6.** Спектральные и геометрические характеристики сосны обыкновенной в семенной куртине

**Figure 6.** Spectral and geometric characteristics of Scots pine in seed blocks

На мультиспектральных изображениях жёлто-зелёный, жёлто-оранжевый, красноватый оттенок проекций крон соответствует лиственным деревьям. На рисунке 7 представлено изображение берёзы пушистой. Выделяется округлая форма проекции кроны с неровным краем, среднезернистая или комковатая текстура за счёт распределения затенённых и освещённых участков в кроне дерева. Благодаря высокому пространственному разрешению снимков с БПЛА, на наклонных проекциях деревьев в видимом диапазоне берёза заметна по белому цвету ствола.

В квартале 96 Вешкельского лесничества исследуемые объекты, включая лесные культуры, семенные куртины, участки естественного возобновления и лесные насаждения, занимают площадь 13,2 га. На ортофотоплане (см. рисунок 1) были отмечены участки семенных куртин площадью 2327 м<sup>2</sup>, 2749 м<sup>2</sup>, 2038 м<sup>2</sup>. Поскольку в куртинах преобладали преимущественно хвойные породы, есть основания считать, что это специально оставленные

семенные куртины, а не участки недорубов; об этом свидетельствует породный состав куртин. Площадь участка естественного возобновления в границах вырубки, на котором отсутствуют ряды лесных культур, составила 2,6 га. Здесь большая часть площади занята лиственными породами. Часть вырубки, на которой выделяются ряды искусственно созданных насаждений, занимает площадь 9,86 га.



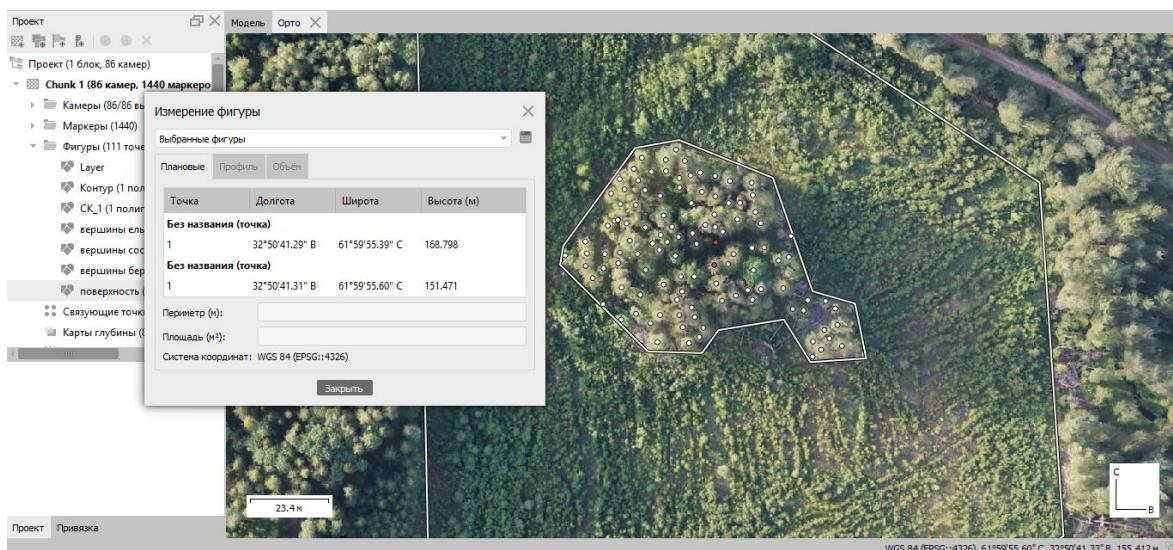
**Рисунок 7.** Спектральные и геометрические характеристики берёзы пушистой в семенной куртине

**Figure 7.** Spectral and geometric characteristics of the fluffy birch in the seed blocks

На основе карты высот и ортофотоплана, которые были получены в результате обработки изображений, проводился анализ высотных особенностей рельефа и насаждений на вырубке. Для оценки высоты деревьев в семенных культурах на ортофотоплане были выделены точки в центрах проекций крон (на вершинах деревьев) и точки на поверхности земли рядом с проекциями крон.

Рассчитанные высотные отметки земной поверхности и вершин растений позволили определить высоты деревьев. На рисунке 8 представлена расстановка точек в центрах проекций крон деревьев в семенной куртине квартала 82 Вешкельского лесничества. Также отмечено измерение высотных отметок вершины дерева и поверхности земли. Разница отметок даёт информацию о высоте дерева, которая составила 17,3 м.

Всего в этой семенной куртине было выявлено 110 вершин деревьев, из них 53 дерева определены как сосна, 45 — берёза, 12 — ель. По результатам измерений средняя высотная отметка вершин сосны составила 164,09 м, берёзы — 162,81 м, ели — 162,30 м. Средняя высотная отметка поверхности земли составила 148,24 м. Учитывая разницу отметок вершин и поверхности земли, определены следующие средние высоты деревьев в семенной куртине: сосна — 15,85 м, берёза — 14,57 м, ель — 14,06 м.



**Рисунок 8.** Параметры высотных отметок вершины дерева (ели европейской) и поверхности земли в семенной куртине квартала 82 Вешкельского лесничества

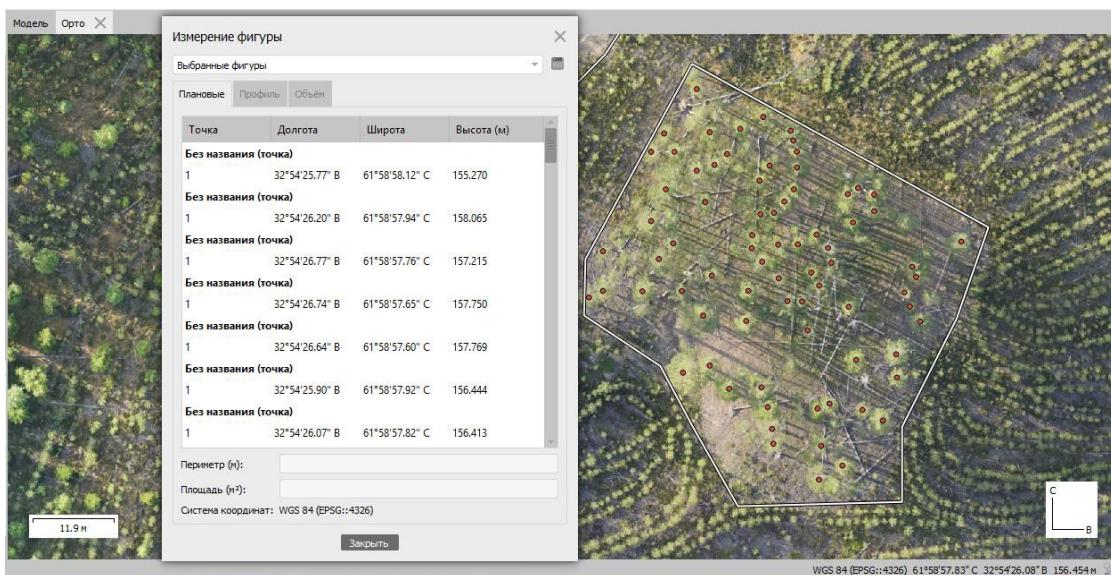
**Figure 8.** Parameters of the height marks of the top of a tree (european spruce) and the ground surface in a seed blocks of 82nd quarter Veshkelsky forestry

На рисунке 9 представлена расстановка точек в центрах проекций крон деревьев в семенной куртине СК-1 квартала 96, в окне измерений показаны координаты точек и их высотные отметки. Разница между высотной отметкой вершины и поверхности земли соответствует высоте дерева. В пространстве СК-1 по ортофотоплану проведено по 77 измерений в центрах проекций крон и на поверхности земли, для СК-2 количество измерений составило по 73, для СК-3 — по 55. По результатам измерения вершин деревьев и значений отметок поверхности земли в семенных куртинах были определены их средние отметки. Результаты вычисления средних высотных отметок и средней высоты деревьев в семенных куртинах представлены в таблице.

**Таблица.** Средняя высота деревьев в семенных куртинах на объекте 2 Вешкельского участкового лесничества

**Table.** Average height of trees in seed blocks in object 2 of the Veshkelsky district forestry

Номер семенной куртины	Средняя высотная отметка вершин, м	Средняя высотная отметка поверхности земли, м	Средняя высота деревьев, м
СК-1	156,49	137,97	18,52
СК-2	155,92	138,0	17,92
СК-3	148,52	133,47	15,04



**Рисунок 9.** Высотные отметки точек в центрах проекций крон деревьев семенной куртины на объекте 1

**Figure 9.** Elevation marks of points in the centers of projections of tree crowns on the object 1

#### 4. Обсуждение и заключение

Таким образом, использование БПЛА и мультиспектральных снимков позволяет оценивать качество лесовозобновления. При этом хорошо «читаются» не только ряды лесных культур, но и примеси хвойных и лиственных пород естественного происхождения не только в рядах, но и в междуурядьях. Кроме этого, с использованием снимков, полученных с помощью БПЛА, можно определять состав молодняков и древостоев в оставленных куртинах, численность по породам, а также биометрические характеристики отдельных растений.

Применение БПЛА позволяет оценивать качество лесохозяйственных работ на труднодоступных лесных участках большой площади. Полученные таким образом материалы можно использовать при разработке Проектов освоения лесных участков, при обновлении Лесохозяйственных регламентов и Лесных планов субъектов РФ.

#### Список литературы

1. Особенности роста подроста сосны под пологом древостоев на сухих бедных почвах / А. В. Грязькин, Н. В. Беляева, И. А. Кази [и др.] // Research Science (Banská Bystrica, Словакия). 2019. № 8. С. 3—6. URL: <http://researchscience.info/payment>. Текст: электронный.

2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 г. № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года».
3. Беляева Н. В. Меры содействия естественному возобновлению — история, современность и перспективы // Международно-исследовательский журнал. 2012. № 7. URL: <https://research-journal.org/archive/7-7-2012-december/200225/>. Текст: электронный.
4. Мочалов Б. А. О нормативных положениях по лесовосстановлению на севере Европейской России и в Финляндии // Лесное хозяйство. 2008. № 2. С. 17—20.
5. Иванов А. И. Содействие естественному возобновлению на вырубках // Труды СПбНИИЛХа. Вып. 2 (12). СПб.: СПбНИИЛХ, 2004. С. 45—56.
6. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 29 декабря 2021 г. № 1024 «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления».
7. Лейнонен Т., Туртиайнен М., Сиеккинен А. Лесовосстановление на Северо-Западе России и сравнение с Финляндией: комментарии финских специалистов. Научно-исследовательский институт леса Финляндии, 2009. 38 с.
8. Соколов А. И. Лесовосстановление на вырубках Северо-Запада России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. 215 с.
9. Динамика роста и оценка состояния культур сосны обыкновенной на вейниково-луговиковых вырубках методами дистанционного зондирования / О. И. Гаврилова, И. В. Морозова, Ю. В. Ольхин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 1 (373). С. 63—74. URL: [http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ab1/63\\_74.pdf](http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ab1/63_74.pdf). Текст: электронный.
10. Аковецкий В. Г., Афанасьев А. В. Методы и технологии интерпретации аэрокосмических мониторинговых наблюдений лесной растительности // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. 2020. № 2. С. 29—36.
11. Дайнеко Д. В. Применение беспилотных летательных систем в лесной отрасли // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях». Иркутск: Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 59—62.
12. Кабонен А. В., Ольхин Ю. В. Цифровое моделирование природно-ландшафтных комплексов по данным, полученным с помощью беспилотных летательных аппаратов // Лесохозяйственная информация. 2020. № 3. С. 101—110.
13. Перевод лесных культур в покрытую лесом площадь с использованием беспилотных летательных аппаратов / Ю. В. Ольхин, О. И. Гаврилова, А. В. Грязькин [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 239. С. 89—103. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.89-103.
14. Оценка естественного возобновления леса на гари с использованием данных, полученных с помощью беспилотного летательного аппарата / А. В. Кабонен, О. И. Гаврилова, А. В. Грязькин [и др.] // Сибирский лесной журнал. Красноярск, 2022. № 2. С. 11—20. DOI: 10.15372/SJFS20220202.
15. Опыт применения квадрокоптера для создания трёхмерной модели лесных насаждений / А. Е. Оsipенко, Я. Коукал, И. А. Панин [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2017. № 4 (63). С. 16—22.
16. Скуднева О. В. Беспилотные летательные аппараты в системе лесного хозяйства России // Известия вузов. Лесной журнал. 2014. № 6 (342). С. 150—154.
17. Петушкиова В. Б., Потапова С. О. Мониторинг и охрана лесов с применением

беспилотных летательных аппаратов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 9. С. 717—722.

18. Филатов А. А., Грязкин А. В., Гаврилова О. И. Оценка структуры и состояния молодняков с использованием беспилотных летательных аппаратов и наземным методом // Лесной вестник / Forestry Bulletin. М., 2022. Т. 26, № 4. С. 21—28. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-21-28.
19. Эпов М. И., Злыгостев И. Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // Международная научная конференция «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: Сб. материалов: В 2 т. Новосибирск: ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ, 2012. Т. 2. С. 27—32.
20. Belcher J. Forest Practices Illustrated. Washington Department of Natural Resources, 2007. 52 p.
21. Dandois J. P., Ellis E. C. Remote Sensing of Vegetation Structure Using Computer Vision // Remote Sens. 2010. 2. 1157—1176. URL: <https://doi.org/10.3390/rs2041157>. Text. Image: electronic.
22. Neuville R., Bates J. S., Jonard F. Estimating Forest Structure from UAV-Mounted LiDAR Point Cloud Using Machine Learning. // Remote Sens. 2021. 13. 352. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13030352>. Text. Image: electronic.

## References

1. Gryazkin A. V., Belyaeva N. V., Kazi I. A., Efimov A. V., Syrnikov I. A. Features of the growth of pine undergrowth under the canopy of stands on dry poor soils. *Research Science* (Banská Bystrica, Slovakia), 2019, no. 8, pp. 3—6. Available at: <http://researchscience.info/payment>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
2. Decree of the Government of the Russian Federation No. 312-r dated February 11, 2021 «On approval of the Strategy for the Development of the Forest complex of the Russian Federation until 2030». (In Russ.)
3. Belyaeva N. V. Measures to promote natural renewal — history, modernity and prospects. *International Research Journal*, 2012, no. 7. Available at: <https://research-journal.org/archive/7-7-2012-december/200225/>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
4. Mochalov B. A. On regulatory provisions on reforestation in the north of European Russia and in Finland. *Forestry*, 2008, no. 2, pp. 17—20. (In Russ.)
5. Ivanov A. I. Promotion of natural renewal in deforestation. *Proceedings of SPbNIILHa*, issue 2 (12). Saint Petersburg, SPbNIILH, 2004, pp. 45—56. (In Russ.)
6. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 1024 dated December 29, 2021 «On approval of the Rules of reforestation, form, composition, procedure for approval of the reforestation project, grounds for refusal to approve it, as well as requirements for the format in electronic form of the reforestation project». (In Russ.)
7. Leinonen T., Turtiainen M., Siekkinen A. *Reforestation in the North-West of Russia and comparison with Finland: comments of Finnish specialists*. Finnish Forest Research Institute, 2009. 38 p. (In Russ.)
8. Sokolov A. I. *Reforestation in the cuttings of the North-West of Russia*. Petrozavodsk, Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2006. 215 p. (In Russ.)
9. Gavrilova O. I., Morozova I. V., Olkhin Yu. V., Yurieva A. L., Ioffe A. O. Growth dynamics and assessment of the state of scots pine crops in veynikovo-meadow cuttings by remote sensing methods. *News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2020, no. 1 (373),

pp. 63—74. Available at: [http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ab1/63\\_74.pdf](http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ab1/63_74.pdf). Text. Image: electronic. (In Russ.)

10. Akovetskiy V. G., Afanasyev A. V. Methods and technologies of interpretation of aerospace monitoring observations of forest vegetation. *Vestnik MGUL — Lesnoy vestnik*, 2020, no. 2, pp. 29—36. (In Russ.)
11. Daineko D. V. The use of unmanned aerial systems in the forest industry. *Materials of the All-Russian scientific and practical conference «The use of unmanned aerial vehicles in geographical research»*. Irkutsk, Publishing House of the V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 2018, pp. 59—62. (In Russ.)
12. Kabonen A. V., Olkhin Yu. V. Digital modeling of natural landscape complexes according to data obtained using unmanned aerial vehicles. *Forestry information*, 2020, no. 3, pp. 101—110. (In Russ.)
13. Olkhin Yu. V., Gavrilova O. I., Gryazkin A. V., Kabonen A. V. Transfer of forest crops to a forested area using unmanned aerial vehicles. *Izvestiya of the Saint Petersburg Forestry Academy*. Saint Petersburg, 2022, no. 239, pp. 89—103. doi: 10.21266/2079-4304.2022.239.89-103 (In Russ.)
14. Kabonen A. V., Gavrilova O. I., Gryazkin A. V., Pak K. A. Assessment of the natural renewal of forests on burning using data obtained using an unmanned aerial vehicle. *Siberian Forest Journal*. Krasnoyarsk, 2022, no. 2, pp. 11—20. doi: 10.15372/SJFS20220202. (In Russ.)
15. Osipenko A. E., Koukal Ya., Panin I. A., Ivanchina L. A., Zalesov S. V. Experience of using a quadrocopter to create a three-dimensional model of forest plantations. *Forests of Russia and agriculture in them*, 2017, no. 4 (63), pp. 16—22 (In Russ.)
16. Skudneva O. V. Unmanned aerial vehicles in the forestry system of Russia. *Izvestiya vuzov. Forest Magazine*, 2014, no. 6 (342), pp. 150—154. (In Russ.)
17. Petushkova V. B., Potapova S. O. Monitoring and protection of forests using unmanned aerial vehicles. *Fire safety: problems and prospects*, 2018, no. 9, pp. 717—722. (In Russ.)
18. Filatov A. A., Gryazkin A. V., Gavrilova O. I. Assessment of the structure and condition of young animals using unmanned aerial vehicles and the ground method. *Lesnoy vestnik — Lesnoy Bulletin*. Moscow, 2022, vol. 26, no. 4, pp. 21—28. doi: 10.18698/2542-1468-2022-4-21-28 (In Russ.)
19. Epov M. I., Zlygostev I. N. The use of unmanned aerial vehicles in aerogeophysical exploration. *International Scientific Conf. «Remote methods of Earth sensing and photogrammetry, environmental monitoring, geoecology»: collection of materials in 2 volumes*. Novosibirsk, INTEREXPO GEO-SIBERIA, 2012, vol. 2, pp. 27—32. (In Russ.)
20. Belcher J. *Forest Practices Illustrated*. Washington Department of Natural Resources, 2007. 52 p.
21. Dandois J. P., Ellis E. C. Remote Sensing of Vegetation Structure Using Computer Vision. *Remote Sens.*, 2010, 2, 1157—1176. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs2041157>. Text. Image: electronic.
22. Neuville R., Bates J. S., Jonard F. Estimating Forest Structure from UAV-Mounted LiDAR Point Cloud Using Machine Learning. *Remote Sens.*, 2021, 13, 352. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs13030352>. Text. Image: electronic.

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7063

УДК 630\*36

*Статья*

## **Исследование и обоснование компоновки и параметров гидропривода механизма подъёма лесного манипулятора**

**Попиков Пётр Иванович**

*доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru)*

**Четверикова Ирина Владимировна**

*кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), [chivles@rambler.ru](mailto:chivles@rambler.ru)*

**Евсиков Иван Дмитриевич**

*аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), [evsfan1997@gmail.com](mailto:evsfan1997@gmail.com)*

**Богданов Дмитрий Сергеевич**

*аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), [bogdanov\\_s69@mail.ru](mailto:bogdanov_s69@mail.ru)*

**Мозговой Николай Васильевич**

*доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (Российская Федерация), [nv\\_moz@mail.ru](mailto:nv_moz@mail.ru)*

*Получена: 22 апреля 2023 / Принята: 14 сентября 2023 / Опубликована: 28 сентября 2023*

---

**Аннотация:** В работе изложены способы снижения динамических нагрузок конструкции лесных манипуляторов в зависимости от компоновки гидравлических цилиндров механизма подъёма стрелы. Составлена математическая модель процесса подъёма стрелы манипулятора. Проведена оптимизация параметров гидропривода подъёма стрелы. Установлено, что оптимизация компоновки гидравлических цилиндров подъёма стрелы лесного манипулятора с учётом сил инерции и податливости гидропривода позволит снизить пиковые всплески давления рабочей жидкости при переходных режимах подъёма лесных грузов. Разработана новая конструктивно-технологическая схема механизма подъёма стрелы манипулятора, обеспечивающая автоматическую установку гидравлического цилиндра подъёма стрелы в оптимальное положение

и демпфирование колебаний рабочей жидкости. Установлено, что при уменьшении номинальной подачи угловая скорость стремится стабилизироваться, а пиковые давления возрастают от 16 до 40 МПа. Проверено, что при увеличении коэффициента податливости гибких элементов гидропривода в 2 раза и коэффициента утечек в 2 раза давление рабочей жидкости возрастает и уменьшается соответственно в 2 раза. Получена оптимальная величина параметра  $b_1$  — точки присоединения гидроцилиндра к стреле, которая равна 0,6 м. За счёт оптимизации компоновки гидравлического цилиндра подъёма стрелы и увеличения коэффициента податливости упругих элементов гидропривода происходит снижение динамических нагрузок на 41 %, но при этом возрастает время затухающих колебаний давления при переходных процессах на 32 %. Это позволит сократить время простоеев манипулятора в ремонте из-за поломок гидрооборудования, что компенсирует незначительное увеличение времени переходных процессов.

**Ключевые слова:** лесные манипуляторы; кинематика; математическая модель; гидравлическое оборудование; стрела

---

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7063

Article (Review)

## **Investigation and justification of the layout and parameters of the hydraulic drive of the lifting mechanism of the forest manipulator**

**Petr Popikov**

*D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), popikovpetr@yandex.ru*

**Irina Chetverikova**

*PhD in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), chivles@rambler.ru*

**Ivan Evsikov**

*Ph. D. student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), evsfan1997@gmail.com*

**Dmitry Bogdanov**

*Ph. D. student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), bogdanov\_s69@mail.ru*

**Nikolay Mozgovoy**

*D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State Technical University (Russian Federation), nv\_moz@mail.ru*

*Received: 22 April 2023 / Accepted: 14 September 2023 / Published: 28 September 2023*

---

**Abstract:** The paper describes ways of reducing the dynamic loads on a forest manipulator construction according to the layout of the hydraulic cylinders of the boom lifting mechanism. A mathematical model of the manipulator boom lifting process has been generated. The parameters of the boom lifting hydraulic drive have been optimized. It is established that the optimization of the hydraulic cylinders layout for lifting the forest manipulator boom by taking into account the inertia forces and the hydraulic drive flexibility will reduce working fluid pressure surge during transient modes of forest freight lifting. A new design and technological scheme of the boom lifting mechanism of the manipulator has been developed to provide automatic optimal positioning of the hydraulic boom lifting cylinder and working fluid vibration damping. It is found that with a decrease in the nominal feed the angular velocity tends to stabilize

and peak pressures increase from 16 MPa to 40 MPa. It has been verified that with twofold increases of the flexibility coefficient of elastic hydraulic drive elements and of the leakage factor the pressure of the working fluid increases and decreases by 2 times respectively. The optimal value of the parameter  $b_1$ , that is the point of the hydraulic cylinder attachment to the boom should be equal to 0.6 m. Dynamic loads are reduced by 41 % due to optimizing the layout of the hydraulic boom lifting cylinder and increasing the flexibility coefficient of the elastic elements of the hydraulic drive. However, the time of damped pressure fluctuations during transients is increased by 32 %. Therefore, the manipulator repair downtime due to hydraulic equipment breakdowns will be reduced to compensate for a slight increase in the time of transient modes.

**Keywords:** forest manipulators; kinematics; mathematical model; hydraulic equipment; boom

---

## 1. Введение

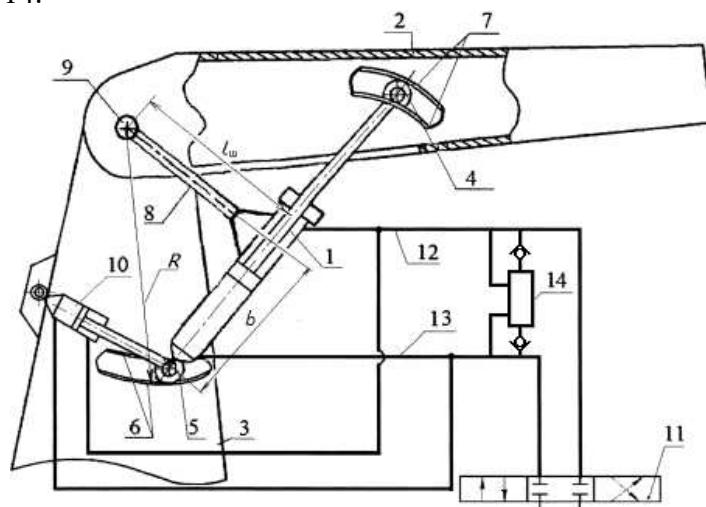
В настоящее время заготовка древесины по-прежнему является доминирующей формой использования лесных ресурсов Российской Федерации. Площадь, на которой осуществляется лесозаготовка, превышает 170 млн га. Согласно Распоряжению Правительства РФ № 1989-р от 20 сентября 2018 г. «О Стратегии развития лесного комплекса РФ до 2030 г.», лесохозяйственному производству требуется техническая и технологическая модернизация с использованием лучших доступных технологий [1]. Импортная техника по производительности и универсальности, надёжности и удобству, простоте эксплуатации и сервисному обслуживанию превосходит отечественные аналоги, но стоит в 2—3 раза дороже. Поэтому важной является проблема импортозамещения оборудования для лесопромышленных предприятий. Таким образом, задача разработки эффективной техники для лесного комплекса, сочетающей новые технические решения, которые смогут обеспечить снижение динамической нагруженности, энергоёмкости, металлоёмкости и вредного воздействия на окружающую среду и оператора, является актуальной.

При проведении сплошных рубок и рубок лесоводственного ухода для вывоза сортиментов и хлыстов широко применяются погрузочно-транспортные машины, оборудованные манипуляторами, что обусловлено их универсальностью и экономической эффективностью. Как показывает анализ исследования динамики гидропривода лесных манипуляторов [2], [3], [4], при подъёме стрелы в рабочих процессах механизмов возникают большие динамические нагрузки [5], [6], [7]. Это приводит к резким скачкам давления рабочей жидкости и уменьшает производительность и надёжность гидроманипуляторов. Известно, что в машинах манипуляторного типа в общем числе возникающих поломок отказы в работе гидропривода составляют 30 %. Максимальные нагрузки манипулятор преодолевает во время переходных процессов при разгоне и торможении движущих звеньев. На число переходных процессов в одном цикле работы манипулятора влияет количество разгонов и торможений движущих звеньев. От характера изменения и значений, возникающих при переходных режимах работы динамических нагрузок, зависит надёжность конструкции. Это говорит о том, что для создания и внедрения манипуляторов высокого технического уровня необходимо более глубокое изучение вопросов кинематики, динамики и компоновки гидроцилиндров.

## 2. Материалы и методы

Объект исследования — гидропривод механизма подъёма стрелы манипулятора сортиментовоза. Предметом исследования является математическая модель рабочих процессов и поиск оптимальных конструктивных параметров гидропривода механизма подъёма стрелы манипулятора.

На рисунке 1 показана предлагаемая гидрокинематическая схема усовершенствованного механизма подъёма стрелы манипулятора. Механизм подъёма стрелы манипулятора состоит из гидроцилиндра 1, шарнирно соединённого через ролики 4 и 5 со стрелой 2 и колонной 3. Ролики 4 и 5 имеют возможность качения в направляющих 6 и 7, выполненных с криволинейным профилем и жёстко закреплённых на стреле и колонне. Корпус гидроцилиндра 1 жёстко соединён под прямым углом с имеющей подвижное соединение с осью 9 штангой 8. Ось 9 совпадает с осью соединяющего колонну и стрелу шарнира. Шток дополнительного гидроцилиндра 10 шарнирно соединён с роликом 5, а его корпус шарнирно соединён с колонной 3. Штоковая и поршневая полости дополнительного гидроцилиндра 10 сообщаются с соответствующими полостями гидроцилиндра 1 подъёма стрелы 2 и посредством гидролиний 12 и 13 параллельно подсоединены к распределителю 11. Криволинейный профиль направляющих 6, закреплённых на колонне 3, выполнен по окружности, центр которой совпадает с осью шарнирного соединения поворотной колонны 3 и стрелы 1, а радиус определяется по формуле  $R = \sqrt{l_{\text{ш}}^2 + b^2}$ , где  $l_{\text{ш}}$  — длина штанги 8,  $b$  — длина участка гильзы гидроцилиндра 1 от места крепления штанги к гидроцилинду до центра ролика 5. Для гашения колебаний между гидролиниями добавляется демпфер 14.



**Рисунок 1.** Гидрокинематическая схема механизма подъёма стрелы манипулятора:  
1 — гидроцилиндр; 2 — стрела; 3 — колонна; 4 и 5 — ролики;  
6 и 7 — направляющие; 8 — штанга; 9 — ось; 10 — дополнительный гидроцилиндр;  
11 — распределитель; 12 и 13 — гидролинии; 14 — демпфер

**Figure 1.** Hydrokinematic scheme of the lifting mechanism of the manipulator boom:  
1 — hydraulic cylinder; 2 — boom; 3 — column; 4 and 5 — rollers; 6 and 7 — guides;  
8 — rod; 9 — axis; 10 — additional hydraulic cylinder; 11 — distributor;  
12 and 13 — hydraulic lines; 14 — damper

Механизм подъёма стрелы манипулятора работает следующим образом. Стрела 2 поднимается при выдвижении штоков гидроцилиндра 1 и дополнительного гидроцилиндра 10. Соединённые с гидроцилиндром 1 и дополнительным гидроцилиндром 10 ролики 4 и 5 перемещаются в направляющих 6 и 7. Поскольку штоковые и поршневые полости гидроцилиндра 1 и дополнительного гидроцилиндра 10 посредством гидролиний 12 и 13 параллельно подсоединены к распределителю 11, то давление рабочей жидкости в соответствующих полостях гидроцилиндров будет одинаковое в процессе подъёма стрелы 2, а гидроцилиндр 1 будет занимать оптимальное положение с минимальным усилием на штоке автоматически. При этом обеспечивается подъём стрелы на заданный угол, а энергозатраты механизма подъёма манипулятора снижаются, возможность заклинивания ролика в нижнем положении стрелы исключается. Это позволяет повысить надёжность и расширить технологические возможности стрелового оборудования манипулятора.

Задача оптимизации положения гидроцилиндра в статическом режиме была решена 50 лет назад различными методами — аналитическим и графическим. Сегодня для новой схемы необходимо решить задачу оптимизации положения гидроцилиндра с учётом динамики и коэффициента податливости гидропривода. Подобные задачи решались в ВГЛТУ более 10 лет назад. Коэффициент податливости гидропривода — величина переменная, определяется экспериментальным путём для каждого опытного образца. Есть мнение отдельных учёных, что коэффициент податливости и динамические нагрузки не оказывают влияния на выбор оптимальных точек присоединения гидроцилиндра, т. е. они одинаковые для статических и динамических нагрузок. Однако логично полагать, что динамика и коэффициент податливости гидропривода должны влиять на выбор оптимальных точек присоединения гидроцилиндра.

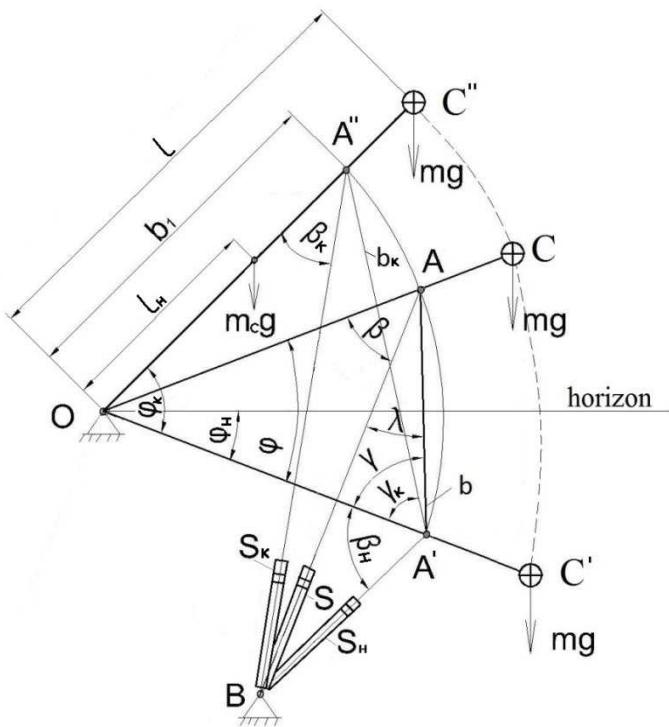
Процесс принятия решения о способах модернизации технического оборудования при современном уровне развития цифровых технологий невозможен без моделирования рабочего процесса. Важная часть такого моделирования — обоснование метода модернизации рабочего процесса или технической конструкции механизмов с целью увеличения эффективности работы [8], [9], [10].

Система дифференциальных уравнений расхода рабочей жидкости в гидроприводе и движения стрелы с учётом воздействия сил инерции и податливости гидропривода имеет следующий вид:

$$QK_t = \left( \frac{\pi d^2}{4} b_1 \sin \beta + \frac{\pi d_1^2}{4} R \right) \frac{d\varphi}{dt} + a_y P + K_p \frac{dP}{dt}, \quad (1)$$

$$\left( J_c + ml^2 \right) \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{\pi d^2}{4} Pb_1 \sin \beta + \frac{\pi d_1^2}{4} PR - g(ml + m_c l_h) \cos(\varphi - \varphi_h),$$

где  $Q$  — номинальная подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $t$  — время, с;  $J_c$  — момент инерции стрелы относительно шарнира О,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $m$  — масса пачки сортиментов, кг;  $l$  — длина стреловой группы ОС, м;  $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$ ;  $b_1$  — расстояние от оси вращения стрелы до верхнего шарнира гидроцилиндра, м;  $a_y$  — коэффициент, учитывающий утечки жидкости,  $\text{м}^5/\text{Нс}$ ;  $P$  — текущее значение давления в гидроприводе, Па;  $K_p$  — коэффициент податливости гибких элементов гидропривода,  $\text{м}^5/\text{Па}$ ;  $d$  — внутренний диаметр гидроцилиндра, м;  $d_1$  — внутренний диаметр дополнительного гидроцилиндра, м;  $R$  — радиус окружности криволинейного профия направляющей 6 (рисунок 2), м;  $\varphi$  — текущий угол подъёма стрелы, град.;  $m_c$  — масса стреловой группы, кг;  $l_h$  — длина отрезка от шарнира О до центра масс стреловой группы, м;  $K_t$  — коэффициент нарастания подачи рабочей жидкости до значения  $Q_h$ ; обозначения остальных параметров, входящих в систему уравнений (1), ясны из рисунка 2.



**Рисунок 2.** Расчётная схема механизма подъёма стрелы

**Figure 2.** The design scheme of the boom lifting mechanism

Положение гидроцилиндра будет влиять на расстояние  $b_1$  и критическое значение угла  $\beta_k$ . Таким образом, эти соотношения являются базовыми аксиомами, которые могут изменяться при изменении положения цилиндра (параметр  $b_1$ ).

Результатом модельного эксперимента должна стать зависимость величины пикового давления  $P_{\max}$  от положения гидроцилиндра, по которой можно определить величину, например, относительного снижения давления или минимальное значение из максимально возможных показателей.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) для определения значения давления рабочей жидкости и угла подъёма стрелы было проведено путём численного интегрирования при последовательных итерациях  $h = \Delta t$  с применением макета программы для ЭВМ, составленного с помощью табличного редактора MS Excel.

Коэффициент податливости гибких элементов гидропривода определялся по эмпирической зависимости

$$K_p = \frac{10^{-5}}{7,28 \cdot P + 106}, \text{ } m^5 / Pa, \quad (2)$$

Для решения системы (1) математическая модель была дополнена следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \beta &= \gamma - \lambda, \\ \lambda &= \arcsin\left(\frac{S_h}{S} \sin(\beta_h + \gamma)\right), \\ S^2 &= b^2 + S_h^2 - 2bS_h \cos(\beta_h + \gamma), \\ b &= 2b_1 \sin \frac{\varphi}{2}, \\ \beta_h &= \arccos \frac{b_k^2 + S_h^2 - S_k^2}{2b_k S_h} - \gamma_k, \\ b_k &= 2b_1 \sin \frac{\varphi_k}{2}, \\ \gamma_k &= 90^\circ - \frac{\varphi_k}{2}, \\ \gamma &= 90^\circ - \frac{\varphi}{2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S_h$  и  $S_k$  — стандартные начальная и конечная длины гидроцилиндра, задаются в исходных данных, м;  $S$  — текущая длина гидроцилиндра.

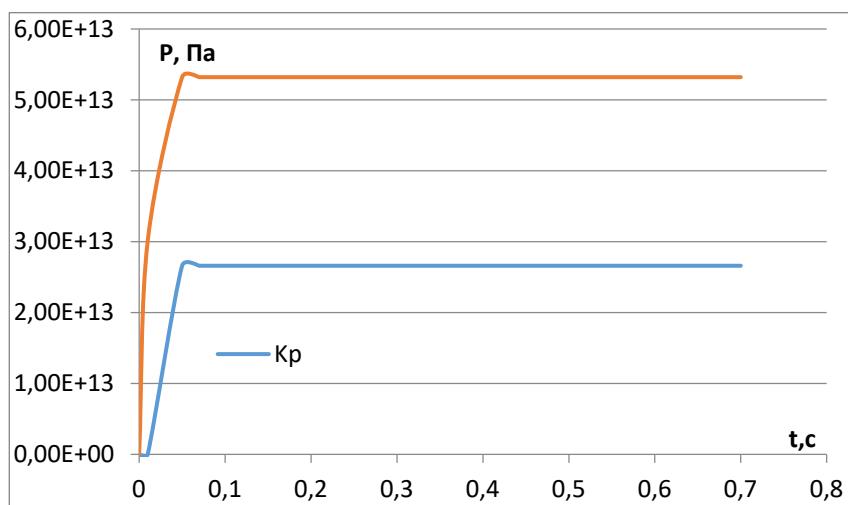
Входные параметры программы представлены в таблице. Границы варьирования углов  $\varphi$  поворота элемента определяются из грузовысотных характеристик манипулятора.

**Таблица.** Входные параметры программы**Table.** Program input parameters

Параметр	Значение
Подача в единицу времени $Q$	0,00133 м <sup>3</sup> /с
Диаметр цилиндра стрелы $d$	0,1 м
Коэффициент утечек в гидросистеме $a_y$	$2 \cdot 10^{-12}$ м <sup>3</sup> /(Па·с)
Время нарастания расхода рабочей жидкости	0 с
Параметр $b_1$	0,447 м
Дискретность изменения времени	0,005 с
Момент инерции стреловой группы относительно точки $O$	7350 кг·м <sup>2</sup>
Масса груза $m$	884 кг
Вылет манипулятора $l$	6,15 м
Масса стреловой группы $m_c$	433 кг
Расстояние от точки $O$ до центра масс стреловой группы $l_h$	3,34 м
Начальное значение угла $\gamma$	76,25°
Значение угла $\delta$	11,61°
Начальное значение угла $\varphi$	$\varphi_H = -15^\circ$
Конечное значение угла $\varphi$	$\varphi_K = 80^\circ$
Время выдержки после остановки	0 с
Минимальная длина гидроцилиндра $S_h$	1 ÷ 1,5 м
Максимальная длина гидроцилиндра $S_k$	1,8 ÷ 2,3 м
Шаг оптимизации положения	0,01 м
Время на процесс поднятия	3 с

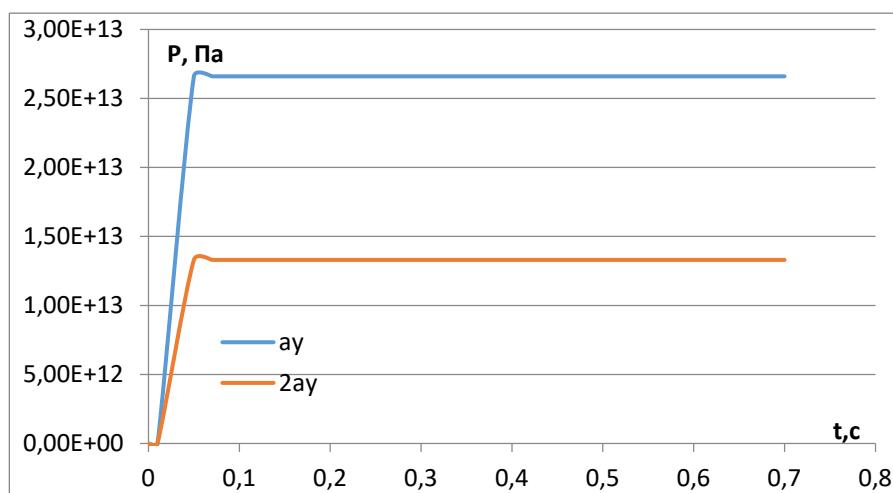
### 3. Результаты

Полученные в результате работы программы графики показали, что в статическом режиме при увеличении коэффициента податливости гибких элементов гидропривода в 2 раза давление рабочей жидкости тоже возрастает в 2 раза (рисунок 3), а при увеличении коэффициента утечек в 2 раза давление рабочей жидкости уменьшается в 2 раза (рисунок 4).



**Рисунок 3.** Зависимость давления рабочей жидкости от времени в статическом режиме при разных коэффициентах податливости.

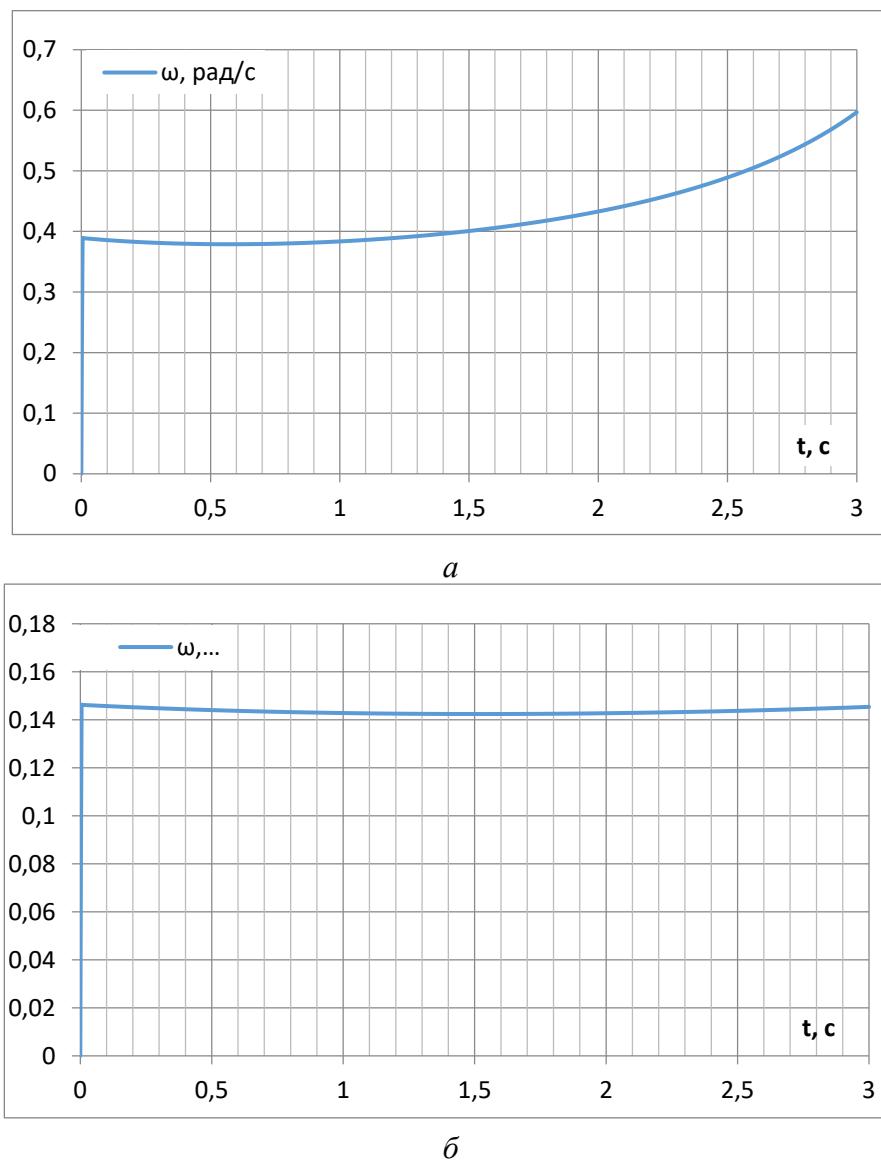
**Figure 3.** The dependence of the working fluid pressure on time in static mode with different flexibility coefficients.



**Рисунок 4.** Зависимость давления рабочей жидкости от времени в статическом режиме при разных коэффициентах утечки

**Figure 4.** The dependence of the working fluid pressure on time in static mode at different leakage coefficients

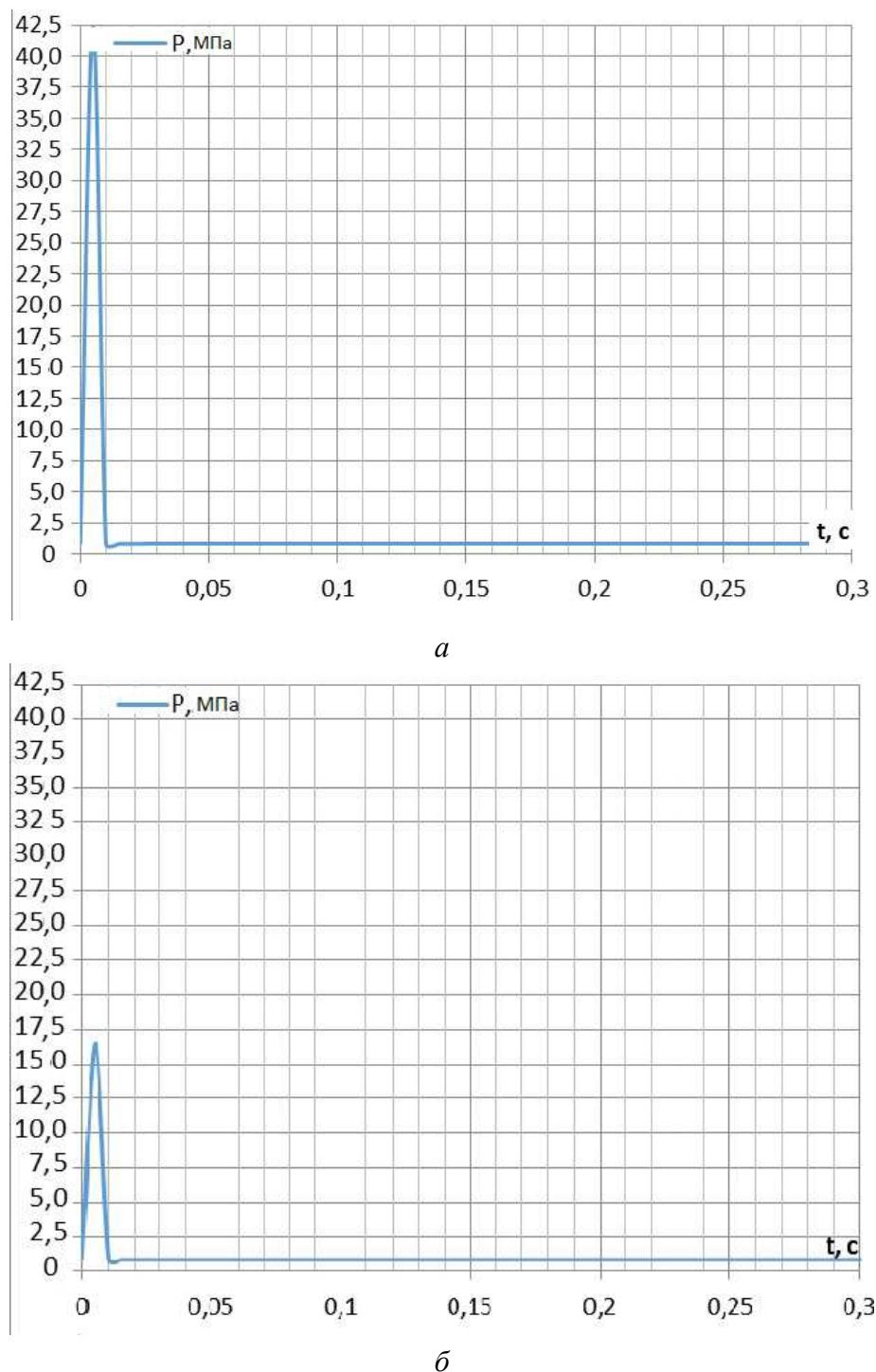
Графики зависимости угловой скорости подъёма стрелы манипулятора при разных значениях номинальной подачи, представленные на рисунке 5, говорят о том, что при уменьшении номинальной подачи угловая скорость стремится стабилизироваться, тогда как с ростом подачи от  $Q = 0,0005 \text{ м}^3/\text{с}$  до  $Q = 0,00133 \text{ м}^3/\text{с}$  она нелинейно возрастает от величины 0,4 рад./с до 0,6 рад./с.



**Рисунок 5.** Характер изменения угловой скорости подъёма стрелы манипулятора при разных значениях номинальной подачи в динамическом режиме:  
 $a — Q = 0,00133 \text{ м}^3/\text{s}; b — Q = 0,0005 \text{ м}^3/\text{s}$

**Figure 5.** Changes in the angular velocity of the manipulator lifting boom at different values of the nominal feed in dynamic mode: (a)  $Q = 0.00133 \text{ m}^3/\text{s}$ ; (b)  $Q = 0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$

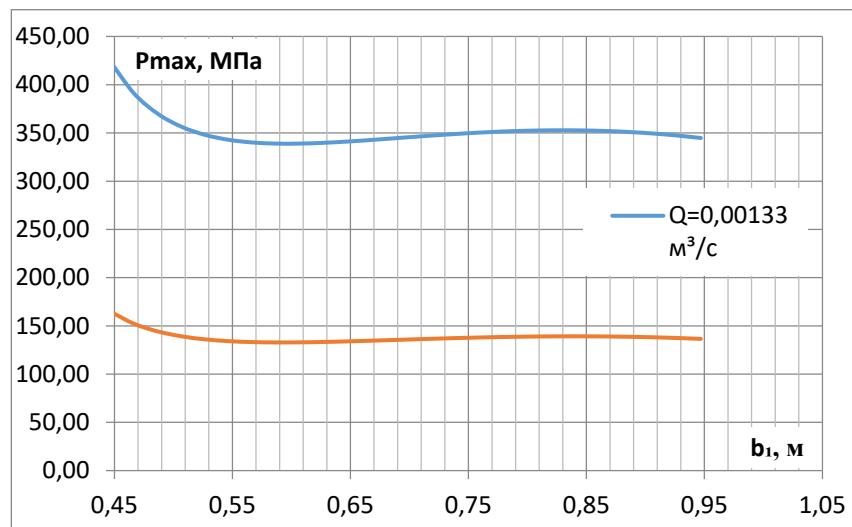
На рисунке 6 показаны примеры графиков зависимости давления рабочей жидкости от времени при разных значениях номинальной подачи.



**Рисунок 6.** Зависимость давления рабочей жидкости от времени в динамическом режиме при разных значениях номинальной подачи: **(а)** —  $Q = 0,00133 \text{ м}^3/\text{s}$ ; **(б)** —  $Q = 0,0005 \text{ м}^3/\text{s}$

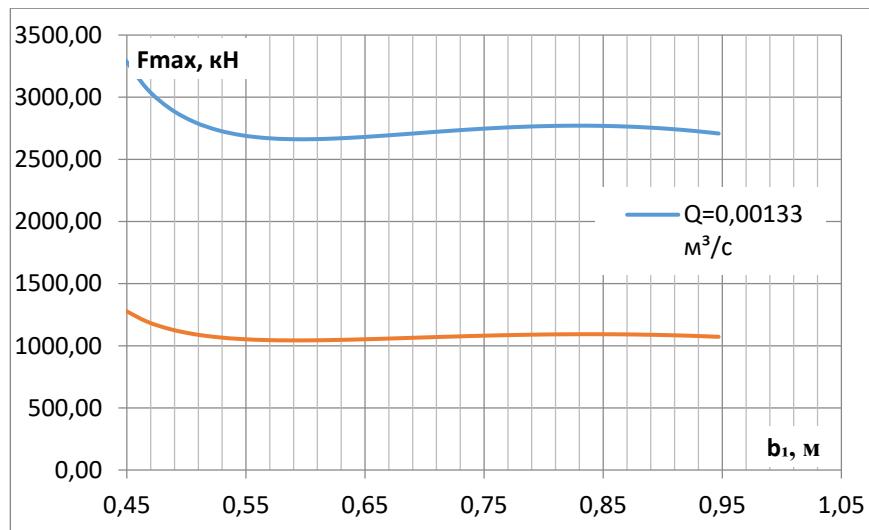
**Figure 6.** The dependence of the working fluid pressure on time in dynamic mode at different values of the nominal flow: **(a)**  $Q = 0.00133 \text{ m}^3/\text{s}$ ; **(b)**  $Q = 0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$

Полученные зависимости максимального давления и максимальной динамической нагрузки при подъёме стрелы манипулятора от параметра  $b_1$  для двух значений номинальной подачи приведены на рисунках 7 и 8.



**Рисунок 7** Зависимость максимального давления от параметра  $b_1$  при подъёме стрелы манипулятора для двух значений номинальной подачи

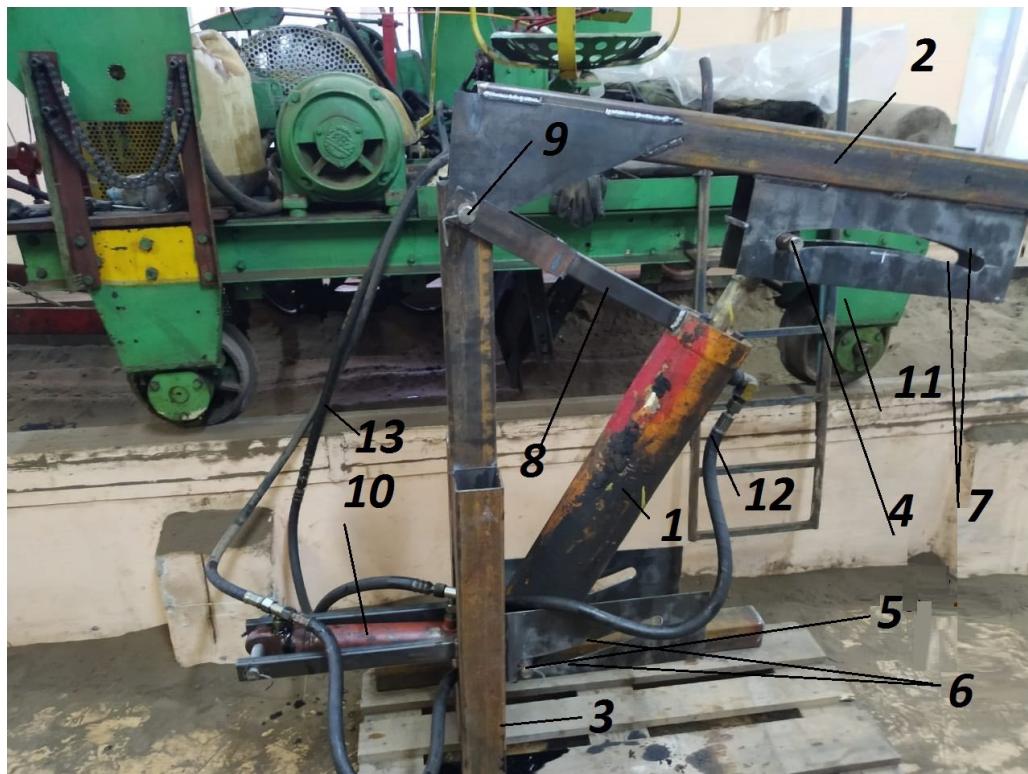
**Figure 7.** The dependence of the maximum pressure on parameter  $b_1$  when lifting the manipulator boom at two nominal feed values



**Рисунок 8.** Зависимость максимальной динамической нагруженности от параметра  $b_1$  при подъёме стрелы манипулятора для двух значений номинальной подачи

**Figure 8.** The dependence of the maximum dynamic load on parameter  $b_1$  when lifting the manipulator boom at two nominal feed values

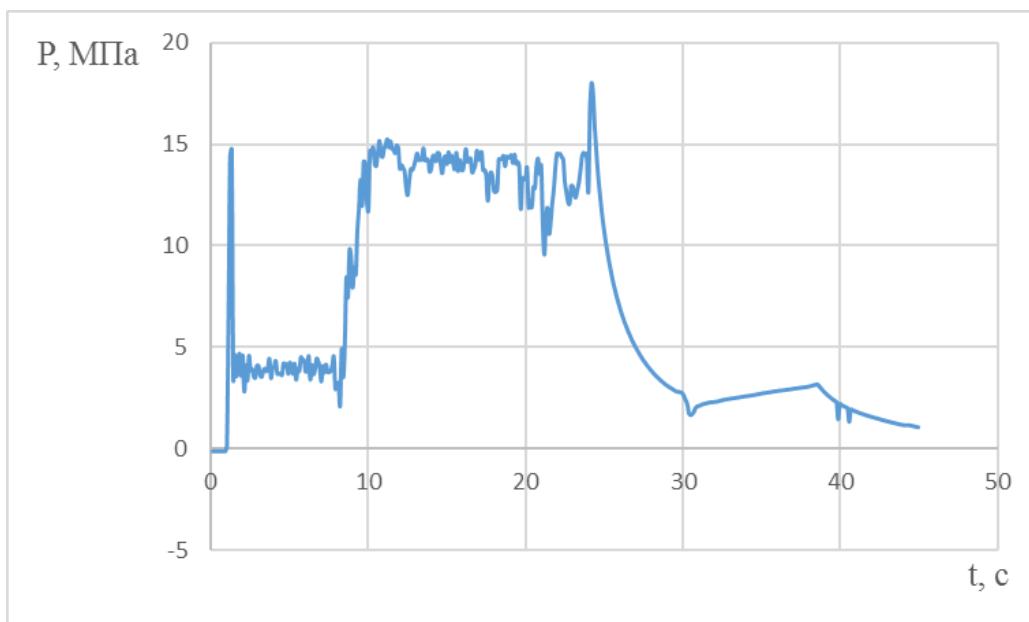
Для проверки адекватности математической модели рабочего процесса механизма подъёма стрелы манипулятора разработана конструкция и изготовлен действующий лабораторный стенд, представленный на фото 1.



**Фото 1.** Действующий лабораторный стенд манипулятора: 1 — гидроцилиндр; 2 — стрела; 3 — колонна; 4 и 5 — ролики; 6 и 7 — направляющие; 8 — штанга; 9 — ось; 10 — дополнительный гидроцилиндр; 11 — передвижная насосная станция; 12 и 13 — гидролинии

**Photo 1.** Operating laboratory stand of the manipulator: 1 — hydraulic cylinder; 2 — boom; 3 — column; 4 and 5 — rollers; 6 and 7 — guides; 8 — rod; 9 — axis; 10 — additional hydraulic cylinder; 11 — mobile pumping station; 12 and 13 — hydraulic lines

Проведённые тензометрические испытания гидропривода лабораторного стенда с записью давления рабочей жидкости в гидроцилиндрах 1 и 10 с помощью датчиков давления ZET 315 и тензолаборатории ZETLAB подтвердили адекватность математической модели с расхождением теоретических и экспериментальных данных 8—9 % (рисунок 9).



**Рисунок 9.** Зависимость давления рабочей жидкости в гидроцилиндре подъёма стрелы от времени в динамическом режиме при номинальной подаче насоса  $Q = 0,0005 \text{ м}^3/\text{s}$

**Figure 9.** Dependence of the pressure of the working fluid in the boom lifting hydraulic cylinder on the time in dynamic mode with nominal pump supply  $Q = 0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 4. Заключение

Анализ проведённого обзора показывает, что при производстве манипуляторов для леса сформировались устойчивые конструктивные решения. Однако работа над конструкциями с целью улучшения их эксплуатационных характеристик, прочности, надёжности, эргономических качеств, снижения массы, повышения энергетической эффективности, устойчивости к коррозии и освещения рабочей площадки должна быть продолжена, поскольку в процессе эксплуатации гидроманипуляторов наблюдается преждевременный выход из строя гидрооборудования. Необходимы новые разработки по усовершенствованию гидросистемы, позволяющие повысить технический уровень лесных манипуляторов.

Динамическая нагруженность конструкции лесных манипуляторов во многом зависит от компоновки гидроцилиндров подъёма стрелы, как наиболее нагруженного механизма, а также от податливости гидропривода. Таким образом, задача снижения динамической нагруженности и энергоёмкости рабочих процессов механизма подъёма стрелы лесного манипулятора путём оптимизации компоновки и параметров гидропривода является актуальной.

Разработана новая конструктивно-технологическая схема механизма подъёма стрелы манипулятора, обеспечивающая автоматическую установку гидроцилиндра подъёма стрелы в оптимальное положение и демпфирование колебаний рабочей жидкости.

Разработана математическая модель рабочего процесса механизма подъёма стрелы манипулятора и программа решения её на ЭВМ. В результате моделирования установлено, что выбор компоновки гидроцилиндра влияет на величину максимальных всплесков давления рабочей жидкости и максимальную нагруженность. Получена оптимальная величина параметра  $b_1$  точки присоединения гидроцилиндра к стреле, равная 0,6 м. Оптимальные точки для компоновки гидроцилиндра при динамическом режиме зависят от номинальной подачи.

Зависимости угловой скорости подъёма стрелы манипулятора при разных значениях номинальной подачи показали, что при уменьшении номинальной подачи угловая скорость стремится стабилизироваться, тогда как с ростом подачи от  $Q = 0,0005 \text{ м}^3/\text{с}$  до  $Q = 0,00133 \text{ м}^3/\text{с}$  она нелинейно возрастает от величины 0,4 рад./с до 0,6 рад./с, а пиковые давления возрастают от 16 до 40 МПа.

## Список литературы

1. *Мазуркин П. М.* Автоматизация технологического оборудования лесозаготовительного производства // Технология лесозаготовок и транспорта леса. Л.: ЛТА, 1984. С. 92—97.
2. Манипуляторы гидравлические автомобильные МГА-40, ГЛГА-65, МГА-95 // Наиболее важные отечественные и зарубежные достижения в области науки, техники и производства по лесному хозяйству. М.: ВНИИЦлесресурс, 1995. С. 68—69.
3. *Хуако З. А.* Теоретическое обоснование эффективности совмещения движений трёх звеньев // Вестник АГУ. Майкоп, 2011. № 3. С. 24—29.
4. Оптимизация параметров гидропривода механизма подъёма манипулятора автосортиментовоза / П. И. Попиков, А. С. Черных, И. В. Четверикова [и др.] // Resources and Technology. 2017. Т. 14, № 4. С. 43—65. URL: <http://rt.petrsu.ru/journal/article.php?id=4021>. Текст: электронный.
5. *Gerasimov Y. Y., Siounev V. S.* Harvester crane key parameters: optimization in European Russian Pines // Journal of Forest Engineering. 2000. № 8. Р. 65—67.
6. *Anisimov G. M., Zhendayev S. G., Zhukov A. V.* Forest machines: Textbook. Allowance. М.: Forest industry, 1989. 512 p.
7. *Kuznetsov E. S., Boldin A. P.* Technical exploitation of cars: Textbook. For higher education institutions. М.: Nauka, 2001. 535 p.
8. *Долженко С. В.* Разработка методики экспериментальных исследований гидропривода механизма поворота лесного манипулятора сортиментовоза // Лесотехнический журнал. 2013. № 1. С. 127—137.
9. *Попиков П. И., Евсиков И. Д.* Обоснование компоновки и параметров гидропривода механизма подъёма лесного манипулятора // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. Т. 7, № 3 (46). С. 226—231.
10. *Chetverikova I., Popikov P., Glushkov S.* Improving the efficiency of manipulator-type machines with an improved hydraulic drive // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions», 2021. 012055.

## References

1. Mazurkin P. M. Automation of technological equipment forestry production. *Technology of logging and wood transport*. Leningrad, LTA, 1984, pp. 92—97 (In Russ.).
2. Manipulators hydraulic car MGA-40, PGA-65, MGA-95. *The Most important domestic. and abroad. achievements in the region of science, technology and production in the forest. hozjaistvu*. Moscow, VNIZlesresurs, 1995, pp. 68—69. (In Russ.).
3. Khuako Z. A. Theoretical substantiation of the effectiveness of combination of movements of the three links. *Bulletin of the ASU*. Maykop, 2011, no. 3, pp. 24—29 (In Russ.).
4. Popikov P. I., Chernykh A. S., Chetverikova I. V., Rodionov D. N., Menyailov K. A. Optimization of the parameters of the hydraulic drive of the lifting mechanism of the manipulator of the auto-sorting truck. *Resources and technologies*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 43—65. URL: <http://rt.petsu.ru/journal/article.php?id=4021>. Text. Image: electronic. (In Russ.).
5. Gerasimov Y. Y., Siounev V. S. Harvester crane key parameters: optimization in European Russian Pines. *Journal of Forest Engineering*, 2000, no. 8, pp. 65—67.
6. Anisimov G. M., Zhendayev S. G., Zhukov A. V. *Forest machines: Textbook. Allowance*. Moscow, Forest industry, 1989. 512 p.
7. Kuznetsov E. S., Boldin A. P. *Technical exploitation of cars: Textbook. For higher education institutions*. Moscow, Nauka, 2001. 535 p.
8. Dolzhenko S. V. Development of methodology of experimental studies of the hydraulic drive of the rotation mechanism of the manipulator forest timber. *Journal of Forestry*, 2013, no. 1, pp. 127—137 (In Russ.).
9. Popikov P. I., Evsikov I. D. Substantiation of the layout and parameters of the hydraulic drive of the lifting mechanism of the forest manipulator. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2019, vol. 7, no. 3 (46), pp. 226—231. (In Russ.).
10. Chetverikova I., Popikov P., Glushkov S. Improving the efficiency of manipulator-type machines with an improved hydraulic drive. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions»*, 2021, 012055.

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7203

УДК 630\*93

*Статья*

## **Анализ нарушений лесного законодательства на примере Республики Карелия**

**Лукашевич Виктор Михайлович**

*кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), lvm-dov@mail.ru*

**Кузнецов Алексей Владимирович**

*доктор технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), kuzalex@psu.karelia.ru*

*Получена: 29 июня 2023 / Принята: 14 сентября 2023 / Опубликована: 28 сентября 2023*

---

**Аннотация:** В статье представлен анализ нарушений лесного законодательства в Республике Карелия. На основе предварительной оценки сформулированы цель и задачи исследования. Цель — оценка лесонарушений на территории Республики Карелия. Задачи: 1) сбор информации по нарушениям лесного законодательства на территории Олонецкого, Муезерского, Медвежьегорского, Кондопожского, Суоярвского, Пудожского центральных лесничеств; 2) анализ нарушений лесного законодательства на исследуемых территориях; 3) выработка рекомендаций и прогнозирование нарушений лесного законодательства. В выборку попали участковые лесничества из шести центральных лесничеств Республики Карелия. Временной промежуток анализа лесонарушений составляет 5 лет (с 2017 по 2021 г.). В процессе анализа установлено, что основными видами лесонарушений являются незаконная рубка леса, оставление не вывезенной в срок древесины, оставление недорубов и неудовлетворительная очистка лесосек от порубочных остатков. На исследованной территории количество некоторых видов нарушений лесного законодательства имеет тенденции к уменьшению (оставление не вывезенной в срок древесины и незаконная рубка леса), в то же время ряд лесонарушений после спада в 2018—2019 гг. имеют тенденцию к увеличению (оставление недорубов и неудовлетворительная очистка лесосек). Объёмы не вывезенной в установленный срок древесины сократились за период с 2017 по 2021 г. примерно в два раза. Объёмы незаконной заготовки леса сократились в 3,5 раза. В начале 2017 г. объёмы нарушений, связанных с оставлением недорубов, сократилась в 4 раза, с 2019 г. увеличились 2,5 раза.

При анализе данных по нарушению, связанному с неудовлетворительной очисткой лесосек, явных закономерностей не выявлено. Авторами отмечается, что неустойки за недорубы необходимо убрать с законодательства и с договоров аренды, т. к. оставление растущего леса никакого вреда и ущерба не приносит, особенно на лесосеках, оставляемых под естественное лесовосстановление. Важно, что решение основных проблем контроля и выявления лесонарушений позволит кардинально исправить ситуацию с профилактикой нарушений лесного законодательства и благоприятно скажется на функционировании лесной экосистемы.

**Ключевые слова:** лесное законодательство; нарушения; Республика Карелия; оценка

---

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7203

*Article*

## **Analysis of forest legislation violations using the Republic of Karelia as an example**

**Viktor Lukashevich**

*Ph. D. in engineering, associate Professor, Petrozavodsk State University*

*(Russian Federation), lvm-dov@mail.ru*

**Aleksey Kuznetsov**

*D. Sc. in engineering, associate Professor, Petrozavodsk State University*

*(Russian Federation), kuzalex@psu.karelia.ru*

*Received: 29 June 2023 / Accepted: 14 September 2023 / Published: 28 September 2023*

---

**Abstract:** The paper presents an analysis of forest legislation violations in the Republic of Karelia. The purpose and the objectives of the study were formulated based on the preliminary assessment. The purpose of the study was to assess forest legislation violations on the territory of the Republic of Karelia. Research tasks included the following: 1. Collection of information on forest legislation violations on the territory of Olonetskiy, Muezerskiy, Medvezhyegorskiy, Kondopozhskiy, Suoyarvskiy, Pudozhskiy central forest ranger stations; 2. Analysis of forest legislation violations in the studied areas; 3. Development of recommendations and forecasting possible forest legislation violations. The sample included forest districts from six central forest ranger stations of the Republic of Karelia. The time period for the analysis of forest legislation violations was 5 years (from 2017 to 2021). The analysis revealed that the main types of forest legislation violations were illegal logging, failing to forward logs by the deadline, incomplete felling and unsatisfactory cleaning of cutting areas from logging residues. In the study area some types of forest legislation violations followed a downward trend (failing to forward logs by the deadline and illegal logging). At the same time, a number of forest legislation violations after a decline in 2018-2019 tended to increase (leaving undercuts and unsatisfactory cleaning of cutting areas). The volume of timber that was not forwarded by the deadline decreased approximately by half over the period from 2017 to 2021. The volume of illegal logging fell 3.5 times. At the beginning of 2017, the volume of violations associated with the incomplete felling decreased by 4 times, however, it has increased by 2.5 times since 2019. No obvious regularities have been revealed by the analysis of the data on the violation connected with unsatisfactory cleaning of cutting areas. The authors note that penalties for incomplete felling should

be removed from the legislation and from lease agreements, since leaving the growing forest does not do any harm or damage especially in the cutting areas left for natural reforestation. It is important that the solution of the main problems of control and detection of forest legislation violations will make it possible to radically improve the situation with the prevention of forest legislation violations and will positively affect the functioning of the forest ecosystem.

**Keywords:** forest legislation; violations; the Republic of Karelia; assessment

---

## 1. Введение

Лесная экосистема играет важную роль в жизни человеческой цивилизации. Использование лесных ресурсов, в т. ч. древесной биомассы, является важным элементом функционирования как экономики Российской Федерации (РФ), так и отдельных её регионов, в частности Республики Карелия (РК). Это обусловлено значительными лесными ресурсами, которыми обладает Россия. Общая площадь лесов на территории России около 1,19 млрд га (20 % всех лесов в мире) [1], в т. ч. 14,9 млн га площадь лесов в РК [2].

Лесное законодательство регулирует отношения в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов, требования к которым отражены в Лесном кодексе и других нормативно-правовых актах. Систематическое проведение анализа нарушений лесного законодательства позволяет оценить, насколько соблюдаются принципы устойчивого управления лесами, их многоцелевого, рационального использования и сохранение полезных функций.

Вопросы сохранения лесов за счёт соблюдения лесного законодательства рассматриваются практически во всех странах, где есть лесные ресурсы. Многие авторы [3], [4], [5] отмечают, что чем выше уровень экономики страны и благосостояние людей, тем меньше происходит нарушений в лесной отрасли. Также в результате обзора источников было выявлено несколько исследований, показывающих интересные тенденции в области лесных отношений и лесонарушений. Во-первых, повышается роль общественности в регулировании лесных отношений. В частности, в работе [6] авторы показывают, что увеличение степени осведомлённости населения о законах и наказании снижает количество нарушений в области лесного хозяйства. Во-вторых, многие компании становятся более открытыми для общественности. В своей статье [7] авторы делают заключение, что предоставление публичной информации о своей деятельности сокращает количество нарушений за счёт дополнительного общественного контроля. Также в этой статье авторы указывают, что более открытыми являются европейские компании, а азиатские и африканские практические не предоставляют информации.

Под лесонарушением понимается противоправное, как правило, виновное деяние, причиняющее вред или несущее реальную угрозу причинения вреда лесам, нарушающее правила лесопользования, охраны и воспроизводства лесов [8], [9]. Специалисты выделяют следующие основные виды лесонарушений [10], [11], [12]: незаконная рубка, самовольное занятие участков лесного фонда, захламление, уничтожение плодородного слоя и лесной подстилки, повреждение деревьев и т. д.

Нарушения можно условно разделить на две группы:

- Первая группа нарушений связана с оценкой ущерба (или вреда) и оценивается по постановлению Правительства № 1730 [13]. В данном документе перечислены 17 различных видов нарушений, которые связаны с незаконной рубкой деревьев (в т. ч. молодняков, подроста, кустарников, сеянцев, лесных насаждений и т. п.) или их

повреждением, нарушением правил по видам пользования (заготовка живицы, недревесных и пищевых ресурсов), самовольное использование земель лесного фонда и его загрязнение и др. Самым существенным нарушением является незаконная рубка леса. Согласно решениям пленума Верховного Суда [14], к незаконной рубке леса относятся рубка лесных насаждений без оформления документов (например, договора аренды и др.); рубка лесных насаждений в объёме, превышающем разрешённый; рубка лесных насаждений с нарушением породного или возрастного состава; рубка лесных насаждений за пределами лесосеки; рубка лесных насаждений с нарушением установленного срока начала рубки; рубка с подложными документами на использование лесов.

■ Вторая группа нарушений связана с обязательствами, которые прописаны в договорах аренды на основе нормативно-правовых актов (правила заготовки древесины, правила ухода за лесом, правила лесовосстановления, правила санитарной безопасности, правила пожарной безопасности и др.). К таким лесохозяйственным нарушениям можно отнести оставление не вывезенной древесины в установленный срок, оставление недорубов, неудовлетворительная очистка лесов от порубочных остатков и др.

Лесонарушения выявляются специалистами лесничеств во время патрулирования и проверки выполнения лесозаготовительных и лесохозяйственных мероприятий (отвода лесосек, мест заготовки древесины, работ по лесовосстановлению, уходу за лесом и др.). При помощи геодезических инструментов или по материалам крупномасштабной аэрофотосъёмки устанавливается соответствие места рубки данным отвода лесосек (чертежу, абрису). При осмотре лесосек оценивают наличие нарушений в пределах лесосеки и в 50-метровой полосы, смежной с ней. При осмотре также оцениваются сохранность и состояние лесных культур, примыкающих к лесосеке (при их наличии), анализируются места расположения складов древесины и территорий, где проложены трассы лесовозных дорог (магистрали, ветки и усы). В настоящее время специалистами предлагается повышать эффективность выявления нарушений лесного законодательства при помощи дистанционного зондирования [15] с использованием космической спутниковой группировки и авиационных средств, в т. ч. беспилотных. Отмечается, что при этом можно оперативно контролировать возникновение и распространение пожаров.

При выявлении лесонарушения в первую очередь фиксируется его местоположение, составляется чертёж, производится определение его объёма при возможности. Например, при незаконной рубке производится сплошной перечёт пней с целью определения объёма древесины. Также производится фотофиксация нарушения.

При камеральных работах проводится подготовка документов и в случае наличия ущерба лесному фонду производится его расчёт в соответствии с постановлением Правительства № 1730 [13]. Если нарушитель не установлен, то составляется акт, который направляется в полицию (ОМВД) для проведения необходимых оперативно-розыскных мероприятий с целью выявления лесонарушителя, привлечения его к ответственности, возмещения материального ущерба, нанесённого лесному хозяйству. Если нарушитель известен,

то составляется протокол об административном правонарушении, который направляется на рассмотрение в органы исполнительной власти (в Республике Карелия это Министерство природных ресурсов и экологии). Если выявленное нарушение является устранимым, то в адрес нарушителя направляется требование об устранении данного нарушения. Один экземпляр протокола виновное лицо получает на руки. В случае если нарушитель на проверку и составление протокола не явился, все вышеуказанные мероприятия проводятся в одностороннем порядке и все документы направляются в адрес нарушителя заказным письмом с уведомлением о вручении. Все лесонарушения заносятся в книгу учёта лесонарушений отдельно по годам, которая является документом постоянного хранения.

Ответственность за нарушение порядка пользования лесами урегулирована как Кодексом РФ об административных правонарушениях [16], так и Уголовным кодексом РФ [17]. Например, согласно ст. 8.28 КоАП РФ, за незаконную рубку лесных насаждений на виновное лицо может быть наложен штраф от 3 до 5 тыс. руб. на гражданина и от 200 до 700 тыс. руб. на юридическое лицо. Согласно ст. 260 УК, за незаконную рубку лесных насаждений возможный штраф может достигать от 100 тыс. до 3 млн руб. или лишение свободы.

На основе предварительной оценки сформулированы цель и задачи исследования.

Цель исследования — оценка лесонарушений на территории Республики Карелия.

Задачи исследования:

- сбор информации по нарушениям лесного законодательства на территории Олонецкого, Муезерского, Медвежьегорского, Кондопожского, Суоярвского, Пудожского центральных лесничеств;
- анализ нарушений лесного законодательства на исследуемых территориях;
- выработка рекомендаций и прогнозирование нарушений лесного законодательства.

## 2. Материалы и методы

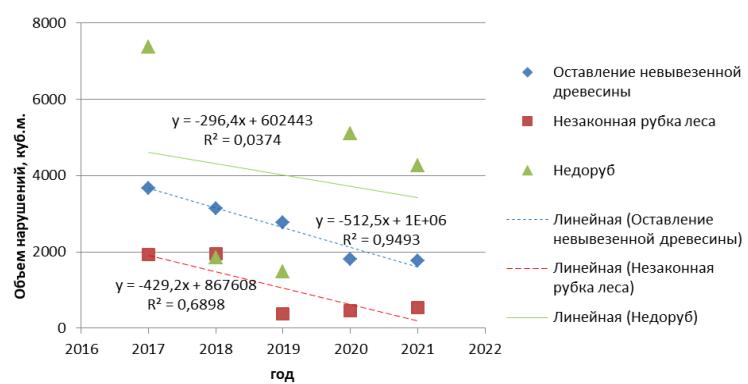
В статье представлен анализ нарушений лесного законодательства на примере Республики Карелия. Территория республики разделена на 17 центральных лесничеств, которые включают 156 участковых лесничеств. Площадь земель лесного фонда в Карелии 14,5 млн га [18], из них на лесные земли приходится 9,7 млн га. Территория республики относится к двум лесным районам: Карельский северно-таёжный (58 %) и Карельский таёжный (42 %). Лесистость территории составляет 53,1 %. По целевому назначению на защитные леса Карелии приходится 33,6 %, на эксплуатационные — 66,4 %. В лесах РК преобладают хвойные породы: сосна обыкновенная и ель обыкновенная, что касается лиственных пород, то здесь основными являются берёза пушистая, берёза бородавчатая, осина и ольха серая [2].

В аренду для заготовки древесины передано порядка 65 % земель лесного фонда. Расчётная лесосека установлена в размере 11,5 млн м<sup>3</sup>, и за последние 10 лет объём освоения составляет 55—60 %. Низкие проценты освоения отмечены в северных лесничествах (Лоухское, Кемское, Беломорское).

Сбор информации по нарушениям и их анализ проводились с 2017 по 2021 г. по участковым лесничествам Олонецкого, Муезерского, Медвежьегорского, Кондопожского, Суоярвского, Пудожского центральных лесничеств, которые затрагивают Карельский северно-таёжный и таёжный районы и включают леса с наиболее интенсивным освоением. Общая площадь участковых лесничеств, участвующих в анализе, составила 3,2 млн га, что составляет 22 % от земель лесного фонда Карелии. В результате исследования собиралась следующая информация: вид нарушения, его объём (в кубических метрах или гектарах), рассчитанный ущерб или договорная неустойка.

### 3. Результаты

В результате анализа собранных данных получено, что наиболее частными нарушениями за период с 2017 по 2022 г. были: оставление не вывезенной в срок древесины (806 шт.), незаконная рубка леса (195 шт.), оставление недорубов (246 шт.), неудовлетворительная очистка лесосек (62 шт.). Также встречались такие виды, как несанкционированная свалка в лесу (20 шт.), самовольное занятие лесного фонда (17 шт.), уничтожение подроста и лесных культур (4 шт.). Для наиболее встречаемых нарушений были проведены более детальные расчёты удельных показателей для территории исследований: объём нарушений на 1000 га земель лесного фонда, рассчитанный ущерб (неустойка) на единицу объёма нарушений и на 1000 га земель лесного фонда. Результаты расчётов приведены в таблице 1. Также построены линии тренда (рисунок).



**Рисунок.** Линии тренда динамики наилучше часто встречающихся нарушений

**Figure.** Trend lines of the dynamics of the most common violations

Опираясь на линии тренда (рисунок), на основе наиболее полноценных групп, выбранных посредством сравнения наибольшего значения коэффициента детерминации  $R$ , был проведён регрессионный анализ с целью определения зависимости динамики изменения объёма лесонарушений определённого вида ( $L$ ,  $m^3$ ) и ущерба ( $Y$ , руб) по годам ( $\Gamma$ ). Степень достоверности полученных результатов подтверждается с помощью коэффициента детерминации  $R$ .

**Таблица 1.** Удельные показатели по наиболее встречающимся лесонарушениям в Республике Карелия за 2017—2022 гг.

**Table 1.** Specific indicators for the most common forest violations in the Republic of Karelia over the period 2017—2022

Вид нарушения	Год	Средний объём нарушений, м <sup>3</sup>	Объём нарушений, м <sup>3</sup>	Объём нарушений на 1000 га ЗЛФ, м <sup>3</sup>	Ущерб (неустойка), руб.	
					на единицу объёма нарушения	на 1000 га площади ЗЛФ
Оставление не вывезенной в срок древесины	2017	918	3675	2,91	418	1216
	2018	785	3140	2,48	585	1456
	2019	692	2770	2,19	578	1268
	2020	453	1815	1,43	679	976
	2021	443	1775	1,4	1035	1455
Незаконная рубка леса	2017	323	1938	0,62	15705	9750
	2018	325	1954	0,62	8366	5235
	2019	63	380	0,12	11420	1393
	2020	75	450	0,14	11689	1687
	2021	90	544	0,17	14147	2468
Оставление недорубов	2017	3679	7359	56	188	10689
	2018	927	1855	14	236	3389
	2019	744	1488	11,5	280	3228
	2020	2551	5103	39	34	1367
	2021	2126	4253	32	10	349
Неудовлетворительная очистка лесосек, га	2017	1,8 га	7,17 га	0,008	14651	131
	2018	7,68 га	23 га	0,05	10349	530
	2019	0,24 га	0,48 га	0,003	9022	28
	2020	0,14 га	0,14 га	0,002	9000	14
	2021	7,8 га	15,6 га	0,04	28771	1256

Оставление не вывезенной в срок древесины (объём лесонарушений ( $L_{н\partial}$ ), м<sup>3</sup>):

$$L_{н\partial} = 1037370 - 512,5 \cdot Г (R - squared = 94,93\%). \quad (1)$$

**Таблица 2.** Дисперсионный анализ уравнения регрессий

**Table 2.** Analysis of variance of the regression equation

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Средний квадрат	Среднеквадратичное значение	Критерий Фишера	P-значение
Модель	$2,62656 \cdot 10^6$	1	$2,62656 \cdot 10^6$	56,17	0,0049
Остаток	140288,0	3	46762,5		
Всего	$2,76685 \cdot 10^6$	4			

Коэффициент детерминации  $R^2 = 94,93\%$ .

Стандартная ошибка оценивания равна 216,246.

Средняя абсолютная погрешность равна 126,0.

Незаконная рубка леса (объём лесонарушений ( $L_{np}$ ), м<sup>3</sup>):

$$L_{np} = 867608,0 - 429,2 \cdot \Gamma \quad (R - squared = 68,98\%). \quad (2)$$

**Таблица 3.** Дисперсионный анализ уравнения регрессий

**Table 3.** Analysis of variance of the regression equation

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Средний квадрат	Среднеквадратичное значение	Критерий Фишера	P-значение
Модель	176358,0	1	176358,0	14,8	0,0308
Остаток	35535,6	3	11845,2		
Всего	211894,0	4			

Коэффициент детерминации  $R^2 = 68,98\%$ .

Стандартная ошибка оценивания равна 525,521.

Средняя абсолютная погрешность равна 338,88.

Оставление не вывезенной в срок древесины (ущерб на единицу объёма нарушения ( $Y$ ), руб):

$$Y = -267464,0 + 132,8 \cdot \Gamma \quad (R - squared = 83,23\%). \quad (3)$$

**Таблица 4.** Дисперсионный анализ уравнения регрессий

**Table 4.** Analysis of variance of the regression equation

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Средний квадрат	Среднеквадратичное значение	Критерий Фишера	P-значение
Модель	$1,84213 \cdot 10^6$	1	$4213 \cdot 10^6$	6,67	0,0816
Остаток	828518,0	34	276173,0		
Всего	$2,67064 \cdot 10^6$	4			

Коэффициент детерминации  $R^2 = 83,23\%$ .

Стандартная ошибка оценивания равна 108,836.

Средняя абсолютная погрешность равна 77,52.

Применение полученных регрессионных зависимостей позволит спрогнозировать количество лесонарушений определённого вида (не вывезенная в срок древесина и незаконная рубка леса) на исследованной территории за определённый период времени, а для не вывезенной в срок древесины сумму ущерба с достаточной для предварительной оценки точностью.

Анализ данных показывает, что объёмы не вывезенной в установленный срок древесины сократились за период с 2017 по 2021 г. практически в два раза и последние два года вышли на удельный показатель 1,41 м<sup>3</sup> на 1000 га земель лесного фонда. Но в то же время удельная неустойка за 5 лет выросла, что может быть связано с инфляцией, которая учитывается в расчётах.

Объёмы незаконной заготовки леса сократились в 3,5 раза и вышли на уровень в среднем 0,15 м<sup>3</sup> на 1000 га земель лесного фонда. Расчётный ущерб от незаконной рубки леса в среднем составляет 12—13 тыс. руб. с кубометра.

Выводы по снижению объёмов не вывезенной в установленный срок древесины и незаконной рубки леса также подтверждаются линиями тренда (см. рисунок) с высокими коэффициентами аппроксимации (детерминации), 0,94 и 0,67 соответственно.

Объёмы нарушений, связанных с оставлением недорубов, не показывают явных тенденций к их снижению. В начале 2017 г. объёмы сократились в 4 раза, а потом с 2019 г. увеличились 2,5 раза. Линейная зависимость снижения объёмов не прослеживается, коэффициент аппроксимации (детерминации) низкий (0,03; см. рисунок). В то же время сумма неустойки за период анализа сократилась очень существенно. Увеличение объёмов недорубов может быть связано с ужесточением учёта древесины. В лесную декларацию заявляется объём заготовки, который должен быть определён при таксации лесосек. При некачественной таксации лесосек или при оформлении лесной декларации по материалам лесоустройства лесопользователь сталкивается с проблемой, когда фактический объём заготовки сильно разнится с объёмом в лесной декларации, и лесопользователю приходится оставлять недоруб, чтобы не превысить этот заявленный объём лесной декларации. Также вероятно, что на лесосеке присутствует множество пород деревьев, которые невозможно в дальнейшем реализовать. Тогда арендатору выгоднее оставить их на лесосеке, чем вырубить, т. к. неустойка за недоруб значительно ниже, чем за не вывезенную древесину. Также, возможно, увеличение объёмов недорубов связано с развитием добровольной лесной сертификации. Согласно требованиям сертификации, на лесосеке необходимо оставлять биотопы, куртины леса, единичные деревья, которые при осмотре лесосек могут трактоваться представителями лесничеств как компактный или расстроенный недоруб.

Считаем, что неустойки за недорубы необходимо убрать с законодательства и с договоров аренды. Оставление растущего леса никакого вреда и ущерба не приносит, особенно на лесосеках, оставляемых под естественное лесовосстановление. При анализе данных по нарушению, связанному с неудовлетворительной очисткой лесосек, явных закономерностей не выявлено.

#### 4. Обсуждение и заключение

Исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что на исследованной территории некоторые виды нарушений лесного законодательства имеют тенденции к уменьшению (оставление не вывезенной в срок древесины и незаконная рубка леса), в то же время ряд лесонарушений после спада в 2018—2019 гг. имеют тенденцию к увеличению (оставление недорубов и неудовлетворительная очистка лесосек). Эти данные коррелируются с исследованиями других специалистов по схожей тематике [10], [19].

Кроме того, спад регистрации лесонарушений может быть связан с неудовлетворительной работой системы контроля и выявления нарушений лесного законодательства. Специалисты лесничеств отмечают целый ряд проблем, которые сказываются на контроле и выявлении лесонарушений: несовершенство лесного законодательства, недостаточная техническая оснащённость лесничеств современной техникой и оборудованием (транспортом, оборудованием для дистанционного зондирования и т. д.), низкие зарплаты работников, нехватка рабочих кадров и т. д. Всё это в совокупности приводит к снижению эффективности своевременного выявления и профилактики лесонарушений. В свою очередь, повышение внимания соответствующих государственных органов к данной проблематике и решение основных проблем контроля и выявления лесонарушений позволит кардинально исправить ситуацию с профилактикой нарушений лесного законодательства и благоприятно скажется на функционировании лесной экосистемы.

#### Список литературы

1. Рослесинфорг обновил сведения государственного лесного реестра на 2022 год // Рослесинфорг. URL: <https://roslesinforg.ru/news/all/6679/> (дата обращения: 29.06.2023). Текст: электронный.
2. Распоряжение Главы Республики Карелия от 30 декабря 2020 года № 814-р (О внесении изменений в Лесной план Республики Карелия) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/465426691> (дата обращения: 29.06.2023). Текст: электронный.
3. *Elvan O. D.* Forest offences in 21st century Turkey (with the example for the offender and trial period of illegal use of the forests in Istanbul) // International Journal of Law, Crime and Justice. 2014. 42. P. 324—339. DOI: 10.1016/j.ijlcj.2014.04.002.
4. *Benja A. E.* The forest offences and the national security of Romania // International Conference Knowledge-Based Organization. 2017. 23. P. 38—43. DOI: 10.1515/kbo-2017-0006.
5. *Ahmed Y. M., Oruonye E. D.* Challenges of enforcement of forestry legislation in Taraba State, Nigeria // International Journal of Geography and Geology. 2017. 6. P. 48—57. URL: <https://doi.org/10.18488/journal.10/2017.6.3/10.3.48.57>. Текст: электронный.
6. *Gencay G., Mercimek A.* Public conscience and influence of law on forest crimes: Insights from Kastamonu, Turkey // Forest Policy and Economics. 2019. 106. P. 101978. DOI: 10.1016/j.forpol.2019.101978.
7. *Colaco R., Simao J.* Disclosure of corporate social responsibility in the forestry sector of the Congo Basin // Forest Policy and Economics. 2018. 92. P. 136—147. DOI: 10.17221/79/2019-JFS.

8. Гусев Р. К. Правовое обеспечение рационального использования и охраны лесов по новому лесному законодательству: состояние и перспективы развития // Правовые проблемы охраны окружающей среды. М.: Интел-Синтез, 1998. С. 47—67.
9. Лукашевич В. М., Корнилов К. А. Оценка влияния технологий лесозаготовок на лесную среду с учётом сезонности ведения работ // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. СПб.: СпбЛТА, 2009. № 186. С. 78—84.
10. Хайрутдинов Ф. Ю., Мусин Х. Г., Хайретдинов А. Ф. Причинно-следственные связи лесонарушений в рекреационных лесах // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2006. № 7. С. 58—59.
11. Гулевская В. В. Современное состояние и перспективы развития судебно-экологической экспертизы по делу о лесонарушениях // Теория и практика судебной экспертизы. 2012. № 1 (25). С. 64—68.
12. Forestry violations as a global issue of legal regulation in the field of forest control and supervision: the Krasnodar territory and the Republic of Bashkortostan case study / R. Iksanov, O. Khalikova, I. Vladimirov [et al.] // Journal of Forest Science. 2021. 67 (6). P. 272—284.
13. Об утверждении особенностей возмещения вреда, причинённого лесам и находящимся в них природным объектам вследствие нарушения лесного законодательства: Постановление Правительства РФ от 29.12.2018 № 1730 (ред. от 18.12.2020) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/552051494> (дата обращения: 29.06.2023). Текст: электронный.
14. О применении судами законодательства об ответственности за нарушения в области охраны окружающей среды и природопользования: Постановление Пленума Верховного Суда РФ № 21 от 18.10.2012 (ред. от 15.12.2022) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://sudrf.cntd.ru/document/902376851> (дата обращения: 29.06.2023). Текст: электронный.
15. Васильева М. А., Степанюгин К. В., Богданов А. В. Выявление нарушений лесного законодательства с использованием систем дистанционного мониторинга на территории Дальневосточного федерального округа // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. 2015. № 4 (68). С. 107—111.
16. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях: Федеральный закон № 195 от 30.12.2001 (ред. от 24.06.2023, с изм. от 13.06.2023) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807667> (дата обращения: 29.06.2023). Текст: электронный.
17. Уголовный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 63 от 13.06.1996 (ред. от 24.07.2023, с изм. от 13.06.2023) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9017477> (дата обращения: 29.06.2023). Текст: электронный.
18. Лесной план Республики Карелия на 2019—2028 гг. // Официальный интернет-портал Республики Карелия. URL: <https://ecology.gov.karelia.ru/about/7248/> (дата обращения: 29.06.2023). Текст: электронный.
19. Дрягина С. А., Кулакова Т. Г., Шевко Н. Н. Некоторые проблемы противодействия незаконным рубкам лесных насаждений (на примере Дальневосточного федерального округа) // Аграрное и земельное право. 2018. № 1 (157). С. 131—137.

## References

1. Roslesinforg updated the information of the state forest registry for 2022. Available at: <https://roslesinforg.ru/news/all/6679/> (date accessed: 29.06.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
2. Decree of the Head of the Republic of Karelia dated December 30, 2020 No. 814-r (On amendments to the Forest Plan of the Republic of Karelia). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/465426691> (date accessed: 29.06.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
3. Elvan O. D. Forest offences in 21st century Turkey (with the example for the offender and trial period of illegal use of the forests in Istanbul). *International Journal of Law, Crime and Justice*, 2014, 42, pp. 324—339. doi: 10.1016/j.ijlcj.2014.04.002.
4. Bență A. E. The forest offences and the national security of Romania. *International Conference Knowledge-Based Organization*, 2017, 23, pp. 38—43. doi: 10.1515/kbo-2017-0006.
5. Ahmed Y. M., Oruonye E. D. Challenges of enforcement of forestry legislation in Taraba State, Nigeria. *International Journal of Geography and Geology*, 2017, 6, pp. 48—57. Available at: <https://doi.org/10.18488/journal.10/2017.6.3/10.3.48.57>. Text. Image: electronic.
6. Gencay G., Mercimek A. Public conscience and influence of law on forest crimes: Insights from Kastamonu, Turkey. *Forest Policy and Economics*, 2019, 106, pp. 101978. doi: 10.1016/j.forpol.2019.101978.
7. Colaco R., Simao J. Disclosure of corporate social responsibility in the forestry sector of the Congo Basin. *Forest Policy and Economics*, 2018, 92, pp. 136—147. doi: 10.17221/79/2019-JFS.
8. Gusev R. K. Legal support for the sustainable use and protection of forests under the new forest legislation: state and development prospects. *Legal problems of environmental protection*. Moscow, Intel-Sintez, 1998, pp. 47—67. (In Russ.)
9. Lukashevich V. M., Kornilov K. A. Evaluation of the impact of logging technologies on the forest environment, taking into account the seasonality of forest works. *Bulletin of Saint Petersburg Forestry Academy*. Saint Petersburg, Saint Petersburg LTA, 2009, no. 186, pp. 78—84. (In Russ.)
10. Khairutdinov F. Yu., Musin Kh. G., Khairetdinov A. F. Causal relationships of forest violations in recreational forests. *Bulletin of Bashkir State Agrarian University*, 2006, no. 7, pp. 58—59. (In Russ.)
11. Gulevskaya V. V. Current state and prospects for the development of forensic environmental expertise in the case of forest violations. *Theory and practice of forensic expertise*, 2012, no. 1 (25), pp. 64—68. (In Russ.)
12. Iksanov R., Khalikova O., Vladimirov I., Gizzatullin R., Baiturina R., Kovshov V., Selezneva A., Khasanova S. Forestry violations as a global issue of legal regulation in the field of forest control and supervision: the Krasnodar territory and the Republic of Bashkortostan case study. *Journal of Forest Science*, 2021, 67 (6), pp. 272—284.
13. On the approval of the specifics of compensation for damage caused to forests and natural objects located in them as a result of violation of forest legislation. Decree of the Government of the Russian Federation of December 29, 2018 No. 1730 (as amended on December 18, 2020). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/552051494> (date accessed: 29.06.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
14. On the application by the courts of legislation on liability for violations in the field of environmental protection and nature management. Resolution of the Plenum of the Supreme Court of the Russian Federation No. 21 of October 18, 2012 (as amended on December 15,

2022). Available at: <https://sudrf.cntd.ru/document/902376851> (date accessed: 29.06.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)

15. Vasilyeva M. A., Stepanyugin K. V., Bogdanov A. V. Identification of violations of forest legislation using remote monitoring systems on the territory of the Far Eastern Federal District. *Bulletin of St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2015, no. 4 (68), pp. 107—111. (In Russ.)
16. Code of the Russian Federation on administrative offenses. Federal Law No. 195 of December 30, 2001 (revised on June 24, 2023, as amended on June 13, 2023). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901807667> (date accessed: 29.06.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
17. Criminal Code of the Russian Federation. Federal Law No. 63 of June 13, 1996 (revised on July 24, 2023, as amended on June 13, 2023). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/9017477> (date accessed: 29.06.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
18. Forest Plan of the Republic of Karelia for 2019—2028. Available at: <https://ecology.gov.karelia.ru/about/7248/> (date accessed: 29.06.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
19. Dryaglina S. A., Kulakova T. G., Shevko N. N. Some problems of countering illegal logging of forest stands (on the example of the Far Eastern Federal District). *Agrarian and land law*, 2018, no. 1 (157), pp. 131—137. (In Russ.)

© Лукашевич В. М., Кузнецов А. В., 2023