

ISSN 2782-3237

Экологический мониторинг и моделирование экосистем

Environmental Monitoring
and Ecosystem Modelling

Том XXXVI № 3-4

2025



Москва 2025

Federal State Budgetary Institution
«Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology»
(FSBI «IGCE»)

**ENVIRONMENTAL MONITORING
AND ECOSYSTEM MODELLING**

Volume XXXVI

№ 3-4

Moscow 2025

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт глобального климата и экологии
имени академика Ю.А.Израэля»
(ФГБУ «ИГКЭ»)

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ**

Том XXXVI № 3-4 2025 год

Научный редактор: Т.Г. Махрова

Выпускающий редактор: В.А. Гинзбург

Технические редакторы:

И.М. Брускина,

Л.В. Кудрявцева

Верстка: Л.А. Прохорова

Фото на обложке:

А.И. Нахутин

Свидетельство о регистрации СМИ: от 15.03.2021 г.
Эл № ФС 77-80601

Адрес редакции:

РФ 107258 г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

Свободная цена

Москва 2025

Федеральное государственное бюджетное учреждение
"Институт глобального климата и экологии
имени академика Ю.А.Израэля"
(ФГБУ "ИГКЭ")

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ

Том XXXVI

№ 3-4

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

К юбилею Галины Михайловны Черногаевой.....	5
---	---

ИССЛЕДОВАНИЯ

Бакурова Э.Ю., Имшенник Е.В., Нахутин А.И.

Разработка национального коэффициента выбросов диоксида углерода от производства технического углерода (сажи) на предприятиях Российской Федерации.....	8
---	---

Лежнев Д.В.

Методологические основы комплексных исследований лесных фитоценозов.....	19
---	----

Шитова А.А., Пафомова Т.В., Квачева Ю.Е.

Радиоэкологические угрозы кремации тел умерших с инкорпорированными при жизни радиоактивными материалами медицинского назначения.....	57
---	----

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ МОНИТОРИНГА

Бурцева Л.В., Александрова М.С., Позднякова Е.А., Брускина И.М.

Ртуть в атмосферном воздухе в фоновых районах стран Северной, Центральной и Восточной Европы.....	64
--	----

Грабар В.А., Лытов В.М.

Атмосферные выбросы парниковых газов от транспортного сектора в России за 2010-2023 гг.....	84
--	----

Махрова Т.Г., Кухта А.Е., Шуйская Е.А., Шерстнева Е.А.

Аборигенная растительность стационара Международной совместной программы комплексного мониторинга в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике.....	106
---	-----

СООБЩЕНИЯ

Коротков С.А., Лежнев Д.В., Фейзрахманов А.Р., Кривошапов Н.Ф.

Флористическое разнообразие живого напочвенного покрова в сосняках природно-исторического парка «Кузьминки-Люблино».....	119
---	-----

Максимова О.В.

Роль частного коэффициента корреляции в статистических выводах.....	133
--	-----

CONTENTS

EVENTS AND COMMEMORATIVE DATES

To the anniversary of Galina Mikhailovna Chernogaeva.....	5
---	---

STUDIES

Bakurova E.Yu, Imshennik E.V., Nakhutin A.I.

Developing of national carbon dioxide emission factor from carbon black production at the enterprises of the Russian Federation.....	8
--	---

Lezhnev D.V.

Methodological foundations of complex studies of forest phytocenoses.....	19
--	----

Shitova A.A., Pafomova T.V., Kvacheva Yu.E.

Radio-ecological threats of cremation of the deceased patient bodies with medical radioactive materials incorporated during life.....	57
--	----

MONITORING

Burtseva L.V., Aleksandrova M.S., Pozdnyakova E.A., Bruskina I.M.

Mercury in the atmospheric air in the background areas of the Nordic countries, Central and Eastern Europe.....	64
--	----

Grabar V.A., Lytov V.M.

The atmospheric greenhouse gas emissions from transport sector in Russia for the years 2010-2023.....	84
--	----

Makhrova T.G. , Koukhtha A.E., Shuyskaya E.A., Sherstneva E.A

Native vegetation of the International Joint Integrated Monitoring Program site in the Central Forest State Nature Biosphere Reserve.....	106
--	-----

MESSAGES

**Korotkov S.A., Lezhnev D.V., Feizrakhmanov A.R.,
Krivoshapov N.F.**

Floristic diversity of living ground cover in the pine forests of the Kuzminki-Lyublino natural historical park	119
--	-----

Maksimova O.V.

The role of the partial correlation coefficient in statistical inference.....	133
--	-----

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

К юбилею Галины Михайловны Черногаевой



В текущем году отметила свой юбилей доктор географических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации Галина Михайловна Черногаева. Весь её трудовой путь связан с совершенствованием таких областей знаний, как география, гидрология, геоэкология. Галина Михайловна вносит значительный вклад в развитие и организацию науки, преподавание, просвещение молодёжи.

Г.М. Черногаева родилась в Москве, в 1963 г. окончила географический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. По окончании учебы поступила на работу в Институт географии Академии наук СССР. В 1977 перешла в Институт прикладной геофизики Главного управления Гидрометеорологической службы при СМ СССР, где трудилась до 1994 г., и где в 1970 г. защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата географических наук на тему «Водный баланс Европы», а в 1994 г. – диссертацию на соискание ученой степени доктора географических наук на тему «Формирование химического состава речных вод в условиях антропо-

генной деятельности». После успешной защиты начала работать в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (в настоящее время – ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (ФГБУ «ИГКЭ»)), где с 2005 по 2015 г. была заместителем директора. В настоящее время Галина Михайловна является главным научным сотрудником.

Возглавляемый Г.М. Черногаевой коллектив развивает методы геосистемного ландшафтного балансового подхода к оценкам экологического состояния промышленных зон, городов, субъектов и округов Российской Федерации, а также речных бассейнов и отдельных природных зон. В центре научных интересов Галины Михайловны были и остаются следующие темы:

- ♥ исследования в области мирового водного баланса, водных ресурсов, баланса и качества вод и водных объектов на территории России;

- ♥ мониторинг, анализ и прогноз состояния абиотических составляющих природной среды;

- ♥ оценка состояния, тенденций и динамики загрязнения окружающей среды в Российской Федерации.

Галина Михайловна – автор более 270 научных работ (из них 10 монографий). Ею разработаны 9 авторских карт в издании «Атлас снежно-ледовых ресурсов мира», получившем в 2001 г. Государственную премию Российской Федерации в области науки и техники.

Под научным руководством Галины Михайловны ежегодно выходят информационные издания Росгидромета. Так, в «Обзоре состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации» даются оценки состояния и загрязнения окружающей среды на территории РФ, основанные на результатах наблюдений, проводимых межрегиональными территориальными управлениями Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Материалы к данному обзору подготавливаются учреждениями Росгидромета. «Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ» представляет обобщенные результаты фоновое мониторинга состояния природной среды на территориях стран СНГ, содержащий данные об уровнях и тенденциях многолетних изменений содержания загрязняющих веществ в атмосфере и атмосферных выпадениях, в почве, растительности и поверхностных водах в фоновых районах.

Г.М. Черногаева является членом редколлегий журнала «Метеорология и гидрология», а также научно-информационного и проблемно-аналитического бюллетеня «Использование и охрана природных ресурсов в России». Кроме того, Галина Михайловна является действительным членом Русского географического общества, академиком Российской экологической академии, членом диссертационного совета Института географии РАН. В рамках созданной Г.М. Черногаевой научной школы и под её научным руководством 8 аспирантов защитили кандидатские диссертации.

Многолетняя научная, общественная, просветительская работа Галины Михайловны высоко оценивается правительством и обществом. Её деятель-

ность отмечена государственными и ведомственными наградами, в том числе медалью «В память 850-летия Москвы», нагрудными знаками «Почетный работник Гидрометеослужбы России» и «Орден В.И. Вернадского».

Особо следует отметить высокую эрудицию, чувство юмора, блестящие ораторские способности и организаторские навыки Г.М. Черногаевой.

Редакционная коллегия ЭММЭ поздравляет Галину Михайловну с юбилеем и желает ей продолжения активной и плодотворной работы, интересных проектов, достойных учеников и крепкого здоровья.

Редакционная коллегия ЭММЭ

Разработка национального коэффициента выбросов диоксида углерода от производства технического углерода (сажи) на предприятиях Российской Федерации

Э.Ю. Бакурова, Е.В. Имшенник, А.И. Нахутин*

ФГБУ «Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля»,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

*Адрес для переписки: e.bakurova@igce.ru

Реферат. Выбросы диоксида углерода от нефтехимического производства в российском национальном кадастре являются ключевой категорией. До 95% вклада выбросов CO_2 в структуру выбросов в этой категории вносят производства этилена, метанола и технического углерода. Уточнение оценки выбросов от нефтехимического производства необходимо для снижения неопределенности расчетов выбросов CO_2 . В статье представлены результаты расчета национального коэффициента выбросов CO_2 от производства технического углерода по данным предприятий-производителей. Национальный коэффициент выбросов рассчитан по методике уровня 2 МГЭИК, основанной на расчете массового баланса углерода в производственном цикле. Коэффициент рассчитан по данным шести крупнейших производителей технического углерода путем определения индивидуальных коэффициентов выбросов для отдельных производств и дальнейшем расчетом средневзвешенного по объемам производства значения. Коэффициенты выбросов существенно зависят от структуры потребляемого сырья. Применение в производстве газового сырья существенно снижает выход целевого продукта и увеличивает образование диоксида углерода до 12 и выше тонн $\text{CO}_2/\text{т}$ технического углерода. Менее углеродоемким является потребление жидкого и твердого углеродсодержащего сырья – удельное образование CO_2 доходит до 2.07 т $\text{CO}_2/\text{т}$ технического углерода. Национальный коэффициент составил 3.178 т $\text{CO}_2/\text{т}$ технического углерода, что на 21% выше коэффициента по умолчанию МГЭИК, использованного ранее. Неопределенность коэффициента рассчитана по методике 1 уровня МГЭИК и составила $\pm 5\%$.

Ключевые слова. Диоксид углерода, парниковые газы, нефтехимическая промышленность, технический углерод

Developing of national carbon dioxide emission factor from carbon black production at the enterprises of the Russian Federation

E.Yu. Bakurova, E.V. Imshennik, A.I. Nakhutin*

Abstract. Carbon dioxide emissions from petrochemical production are a key category in the Russian national greenhouse gas inventory. Up to 95% of CO₂ emissions in this category come from the production of ethylene, methanol, and carbon black. Refining emissions estimates for petrochemical production is necessary to reduce uncertainty in CO₂ emissions estimates. This paper presents the results of developing a national CO₂ emission factor for carbon black production based on data from manufacturing enterprises. The national emission factor was developed using the IPCC Tier 2 methodology, which relies on a carbon mass balance approach across the production cycle. The factor was developed using data from six major carbon black enterprises by determining individual emission factors for specific production facilities and then computing a production-weighted average. Emission factors are highly dependent on the feedstock structure. The use of gaseous feedstock significantly reduces target product yield and increases CO₂ generation to 12 or more tons of CO₂ per ton of carbon black. In contrast, the utilization of liquid and solid feedstock substantially reduces CO₂ emissions, with specific CO₂ emissions reaching up to 2.07 tons of CO₂ per ton of carbon black. The national emission factor was determined to be 3.178 tons of CO₂ per ton of carbon black, which is 21% higher than the default IPCC factor previously used. The uncertainty of the factor, calculated using the IPCC Tier 1 methodology, was estimated at $\pm 5\%$.

Key words. Carbon dioxide, greenhouse gases, petrochemical industry, carbon black.

Введение

Настоящая работа посвящена разработке национального коэффициента выбросов диоксида углерода от производства технического углерода (ТУ), ее целью было совершенствование оценки выбросов диоксида углерода от нефтехимической промышленности в национальном кадастре выбросов парниковых газов Российской Федерации.

В соответствии с руководством Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), среди продуктов производства нефтехимической промышленности оцениваются выбросы CO₂ и CH₄ от метанола, этилена и пропилена, этилендихлорида, окиси этилена и акрилонитрила. Выбросы CO₂ и CH₄ от производства ТУ включены в данную категорию несмотря на то, что он не считается нефтехимическим продуктом, поскольку он производится из нефтехимического сырья. Оценка выбросов CO₂ в российском национальном кадастре выбросов парниковых газов осуществлялась по методике первого уровня МГЭИК, в связи с отсутствием подробных данных о технологических особенностях российских производств.

Выбросы CO₂ от нефтехимического производства в российском национальном кадастре являются ключевой категорией. В 2021 году доля выбросов

парниковых газов в национальном кадастре от этой категории без учета сектора Землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство составила 0.81% (НДК, 2023). Основным парниковым газом в структуре категории является диоксид углерода с долей в 2021 году 96.4%. В связи с этим, оценка выбросов CO₂ от нефтехимических производств и производства ТУ должна производиться по методике 2 уровня МГЭИК, учитывающей национальные технологические особенности производств в Российской Федерации. Производство ТУ является одним из крупнейших эмитентов CO₂ в категории нефтехимических производств, уступая только производству этилена и метанола. Совокупный вклад в выбросы CO₂ от нефтехимии, который вносят эти три источника, достигает 95%.

Анализ текущего состояния отрасли производства ТУ, обзор предприятий

По состоянию на 2023 год в Российской Федерации функционирует более восьми производителей ТУ. Шесть крупнейших из них, представленных в табл. 1, производят более 98% ТУ.

Таблица 1. Крупнейшие в Российской Федерации производители ТУ

Table 1. The largest producers of carbon black in Russian Federation

№	Название предприятия	Производственная мощность, тыс. тонн/год	Технология производства
1	АО «Ярославский технический углерод имени В.Ю. Орлова»	350	Печная
2	ОАО «Омсктехуглерод»	280	Печная
3	АООТ «Волгоградский завод технического углерода»	200	Печная
4	АО «Нижекамсктехуглерод»	113	Печная
5	ОАО «Туймазинский завод техуглерода»	35	Печная
6	Сосногорский газоперерабатывающий завод ООО «Газпром переработка»	30	Печная
		15	Термическая

Производство ТУ преимущественно осуществляется по двум технологиям – печной и термической. В основе классификации процессов его производства лежит тип сырья и химического процесса. Печная технология представляет собой процесс термоокислительного разложения остатков переработки нефти и угля, а также природного газа. В основе термической технологии лежит процесс термического разложения, преимущественным сырьем является природный газ. Эти различия обуславливают возможности получения отличных друг от друга марок ТУ. Технологии также характеризуются разными возможными выходами целевого продукта – печная технология позволяет получать ТУ с выходом 40-60%, а термическая – до 30%.

Помимо упомянутых технологий, производство ТУ возможно с использованием канального и ацетиленового метода, однако в настоящее время в Российской Федерации они не применяются. Для получения ТУ в России наиболее широко используется печная технология, производственные мощности которой составляют более 95% всех мощностей производства ТУ в стране.

Термическая технология реализована на единственном в России предприятии в г. Сосногорске. Этот завод производит ТУ на двух линиях. Второй из применяемых на предприятии технологий является печная технология, однако это единственное предприятие в стране, на котором она реализована с потреблением газового сырья.

Помимо технологических различий, для производства ТУ на разных предприятиях используется различное сырье. Преобладающими типами сырья в целом по стране являются каталитические газойли, мазуты и тяжелые смолы пиролиза, на одном предприятии производство осуществляется из газового сырья – сухого отбензиненного газа и газа стабилизации. На всех предприятиях топливом выступает природный газ, одновременно выступающим в роли вторичного сырья, так как углерод из природного газа также переходит в целевой продукт производства.

Разработка коэффициента выбросов

Методика уровня 2 МГЭИК для нефтехимической промышленности представляет собой метод, основанный на балансе углерода для конкретного сырья и процесса. Он используется для расчета разницы между количеством углерода, введенным в производственный процесс в составе первичного и вторичного сырья, и количеством углерода, выходящем из процесса в составе продукта производства. Полученное количество углерода, выходящего из процесса, умножается на коэффициент перевода C в CO_2 . Данная методика включает допущение о том, что весь углерод, введенный в процесс, перешел либо в продукты производства, либо в CO_2 . Для расчетов использовалось уравнение (1) (IPCC, 2006):

$$E_{CO_2} = (\Sigma(FA_k \cdot FC_k) - CP \cdot CC) \cdot 44/12, \quad (1)$$

где:

E_{CO_2} – выбросы CO_2 от производства технического углерода, тонны,

FA_k – годовое потребление сырья k , тонны,

FC_k – содержание углерода в сырье k , %,

CP – годовое производство технического углерода, тонны,

CC – содержание углерода в техническом углероде, %.

Коэффициент выбросов от производства ТУ рассчитывался по формуле (2):

$$EF_{CO_2} = \frac{E_{CO_2}}{CP}, \quad (2)$$

где:

EF_{CO_2} – коэффициент выбросов CO_2 от производства ТУ, т CO_2 /т ТУ,

E_{CO_2} – выбросы CO_2 от производства ТУ за год, тонны,

CP – годовое производство ТУ, тонны.

Элементарный состав сырья представлен в табл. 2. Он определялся как по литературным данным, так по информации, полученной от предприятий.

Таблица 2. Элементарный состав сырья для производства ТУ

Table 2. The elemental composition of feedstock for carbon black production

Наименование сырья	Элементарный состав, масс. %			
	С	Н	S	N (O)
Первичное сырье – основное				
Масло антраценовое (Гюльмисарян, Гилязетдинов, 1975)	90.6	6.4	0.5	0.6 (2.1)
Тяжелый газойль каталитического крекинга (Ивановский, 2004)	90.6	7.1	-	-
Смола пиролизная тяжелая (Мухамедзянова и др., 2012)	91.4	7.8	0.2	-
Остаток тяжелый нефтяной:				
Гудрон (Ахметов, 1997)	85.1	10.7	3.4	0.5
Смолы (Мусина, 2014)	79-87	1-2	5.1±0.4	0.5±0.1 (1.0±0.2)
Асфальтены (Мусина, 2014)	85±3	8.1±0.7	-	-
Смола каменноугольная (Павлович, 2006)	92	5.5	0.7	0.9 (1.6)
Коксохимическое сырье:				
Антраценовая фракция (Кузнецов и др., 2021)	87.6	5.2	-	-
Пековый дистиллят (Гюльмисарян, Гилязетдинов, 1975)	89.5	5.6	1.3	1.3±2.4
Мазут топочный (Рябцев, Волков, 1968)	87.6	10.5	0.7-1.0	1.0
СОГ (сухой отбензиненный газ) (Егорова, 2001)	74.7	-	-	-
Газ стабилизации (по данным ООО «Газпром переработка»)	72.0	-	-	-
Газ ароматизации (по данным ООО «Газпром переработка»)	74.3	-	-	-
Тяжелый остаток производства бензина (Мусина, 2014)	84.8	-	-	-
Вторичное сырье – присадки				

Наименование сырья	Элементарный состав, масс. %			
	С	Н	S	N (O)
Лигносультфонаты технические (по данным ООО «Омсктехуглерод»)	44.9	4.5	2	(29.9)
Полипласт ДТ-500.3НО (по данным ООО «Омсктехуглерод»)	38.2	-	-	-
Вторичное сырье – топливо				
Природный газ (по данным АО «ЯТУ им. В.Ю. Орлова»)	74.7	-	-	-

Элементарный состав ТУ определялся по данным предприятий, среднее содержание компонентов в продукте производства представлено в табл. 3.

Таблица 3. Химический состав ТУ разных способов получения
Table 3. Chemical composition of carbon black by production method

Элемент	Массовая доля, %		
	печной	термический	канальный
Углерод	98.0-99.0	≥99.0	92.0-96.0
Кислород	<1.0	<0.3	3.0-7.0
Водород	<0.4	0.4	0.5
Сера	0.5-1.8	<0.1	<0.1

Сотрудничество с предприятиями позволило получить непосредственные данные о производственных параметрах за разное время, Наиболее полный набор данных был получен от ООО «Газпром переработка» и ООО «Омсктехуглерод», однако, в виду отсутствия более подробных данных от иных предприятий, расчет национального коэффициента производился по данным 2022 года,

От производителей были получены следующие данные:

1. Объем производства ТУ по маркам и применяемой технологии производства.
2. Масса первичного сырья, использованного в производстве ТУ, по видам.
3. Масса вторичного сырья (природного газа), использованного в производстве ТУ.
4. Характеристики вторичного сырья (состав природного газа и его плотность).

В табл. 4 представлены обобщенные данные объемов произведенного ТУ в 2022 году, объемы и типы использованного сырья.

Расчет национального коэффициента выбросов производился путем расчета средневзвешенного значения между коэффициентами выбросов каждого предприятия, представленными в табл. 5, и объемами их производства.

Таблица 4. Объемы использованного сырья и производства ТУ

Table 4. Volumes of feedstock consumption and carbon black produced

Тип использованного сырья	Масса потребленного сырья, т	Масса потребленного природного газа, т	Произведено ТУ
<i>Печная технология производства</i>			
Жидкое сырье	1532215.0	297574.0	878998.0
Газообразное сырье	65514.0	-	11501.0
<i>Термическая технология производства</i>			
Газообразное сырье	28662.0	-	5346.0

Таблица 5. Коэффициенты выбросов предприятий-производителей ТУ

Table 5. Emission factors of carbon black manufacturing facilities

Предприятие	Рассчитанный коэффициент выбросов	
	2015	2022
<i>Печная технология производства</i>		
ОАО «Туймазинский завод теухглерода»	2.07 ¹⁾	2.07
АО «ЯТУ им. В.Ю. Орлова»	3.16	2.89
АО «Нижекамсктеухглерод»	3.05	2.88
ООО «Омсктеухглерод»	2.60 ²⁾	3.17
Волгоградский филиал ООО «Омсктеухглерод»	2.72 ²⁾	3.51
ООО «Газпром переработка»	11.60	12.00
<i>Термическая технология производства</i>		
ООО «Газпром переработка»	9.32	11.50

Примечания: 1. Коэффициент за 2022 год.
2. Коэффициенты за 2017 год.

В силу того, что термическая технология производства ТУ в России реализована на единственном предприятии, производственные мощности которого составляют менее 5% от всех мощностей в стране, расчет средневзвешенного коэффициента производился единожды для всех технологий производства.

Повышенные коэффициенты выбросов у предприятия ООО «Газпром переработка» связаны с применением на производстве исключительного газового сырья, особенность использования которого связана со сравнительно низким выходом целевого продукта в процессе производства, что влечет за собой существенное увеличение выбросов CO₂.

Было произведено определение средневзвешенного по объемам производства коэффициента выбросов для 2022 и 2015 годов. Далее путем расчета между ними среднего значения был получен национальный коэффициент выбросов, составивший 3.178 т CO₂/т ТУ, превышающий коэффициент по умолчанию МГЭИК на 21%.

Сравнение объемов выбросов CO_2 от производства ТУ в 1990-2022 гг, с использованием коэффициента выбросов по умолчанию и рассчитанного в рамках данной работы национального коэффициента выбросов представлено на рис. 1.

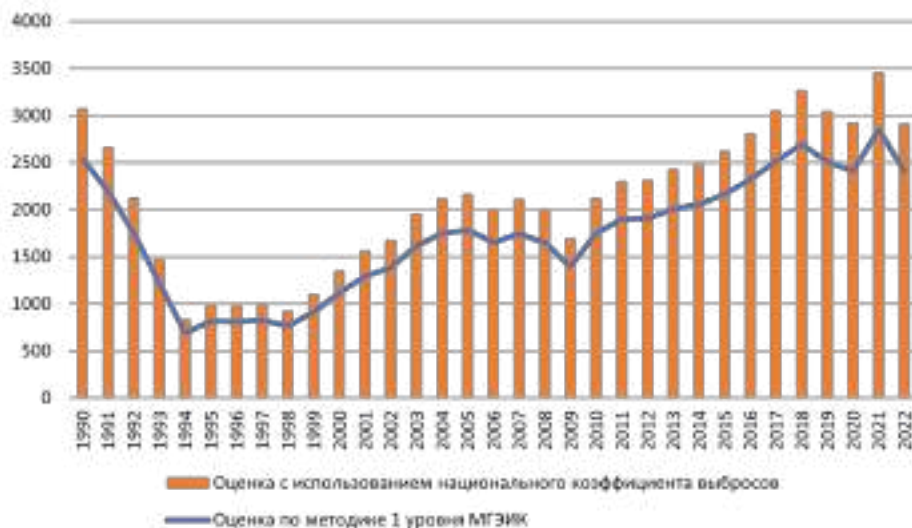


Рисунок 1. Сравнение результатов оценки выбросов CO_2 от производства ТУ по методике 1 уровня МГЭИК и с использованием разработанного национального коэффициента выброса, Гг

Figure 1. Comparison of CO_2 emission estimates from carbon black production using IPCC Tier 1 methodology and the developed national emission factor, Gg

Диапазон неопределенности оценки выбросов при использовании метода материального баланса по данным отдельных предприятий, согласно (IPCC, 2006), составляет $\pm 5\%$.

Полученные результаты уникальны для мировой практики национальной инвентаризации выбросов диоксида углерода от производства ТУ – в базе данных коэффициентов выбросов МГЭИК (IPCC-EFDB) отсутствуют какие-либо разработанные коэффициенты выбросов для данного источника, кроме коэффициентов МГЭИК по умолчанию, что делает невозможным сравнения полученных результатов с данными Нацкадастров других стран и подчеркивает актуальность проведенного исследования".

Выводы

Отрасль производства ТУ в России представлена шестью крупнейшими предприятиями, суммарно производящими более 98% ТУ в стране, Преимущественной технологией производства является печная технология, с применением которой производится 99% ТУ.

Печная технология, в сравнении с термической, обеспечивает более высокий выход целевого продукта (до 60%), применение печного метода несет в себе преимущество в виде снижения удельного образования CO_2 .

Основным сырьем для производства ТУ в стране являются богатые углеродом газойлевые фракции термоллиза и каталитического крекинга, антраценовая фракция и различные углеводородные смеси, образующиеся в процессах переработки нефти и производства нефтехимических продуктов, Газовое сырье применяется на единственном предприятии, чья доля производства на рынке составляет менее 2%. Применение газового сырья в производстве существенно повышает удельное образование CO_2 , из-за сравнительно низкого выхода целевого продукта производства,

Рассчитанный национальный коэффициент выбросов CO_2 от производства ТУ составил 3.178 т CO_2 /т технического углерода, что на 21% выше коэффициента по умолчанию МГЭИК, применявшегося ранее.

Применение метода материального баланса по данным отдельных предприятий позволило снизить неопределенность оценки выбросов CO_2 до $\pm 5\%$.

Работа выполнена в рамках проекта «Российская система климатического мониторинга» (ВИП-ГЗ) в 2023-2024 гг.

Список литературы

- Ахметов, С.А. (1997) *Физико-химическая технология глубокой переработки нефти и газа*, Учебное пособие. Часть 2, Уфа, УГНТУ, 304 с.
- Гюльмисарян, Т.Г., Гилязетдинов, Л.П. (1975) *Сырье для производства углеродных печных саж*, М., «Химия», 149 с.
- Егорова, С.Р. (2001) *Ароматизация алифатических углеводородов с использованием модифицированных цеолитсодержащих катализаторов*, диссертация... кандидата химических наук, 05.17.04. Казань, 150 с. ил, РГБ ОД, 61 02-2/47-7.
- Ивановский, В.И. (2004) *Технический углерод, Процессы и аппараты*, Учебное пособие, Омск, ОАО «Техуглерод», 228 с.
- Кузнецов, П.Н., Сафин, В.А., Авид, Б., Кузнецова, Л.И., Пурэвсүрэн, Б., Исмагилов, З.Р. (2021) Термическое растворение углей ряда метаморфизма в антраценовой фракции смолы коксования, анализ корреляционных связей с химико-технологическими свойствами углей, *Химия твердого топлива*, № 2, с. 1-3.
- Мусина, Н.С. (2024) *Разработка способов определения элементного и углеводородного состава тяжелых нефтяных остатков*, диссертация... кандидата химических наук: 02.00.02. Москва, 186 с.
- Мухамедзянова, А.А., Гимаев, Р.Н., Хайбуллин, А.А., Теляшев, Э.Г. (2012) Исследование качественных характеристик тяжелой смолы пиролиза, *Вестник Башкирского университета*, т. 17, № 2, с. 909-915.

Павлович, О.Н. (2006) *Состав, свойства и перспективы переработки каменноугольной смолы*, Учебное электронное текстовое издание, Екатеринбург, УГТУ-УПО, 41 с.

Российская Федерация (2023) *Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2021 гг*, в 2 томах, М.

Рябцев, И.И., Волков, А.Е. (1968) *Производство газа из жидких топлив для синтеза аммиака и спиртов*, М., «Химия», 207 с.

IPCC (2006) 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe K. (eds.), Published: IGES, Japan.

Intergovernmental panel on climate change – emission factor database, URL: www.ipcc-nggip.iges.or.jp.

References

Akhmetov, S.A. (1997) *Fiziko-khimicheskaya tekhnologiya glubokoy pererabotki nefi i gaza* [Physico-chemical technology of deep oil and gas processing, Textbook, Part 2], Ufa, UGNTU, Russia, 304 p.

Gyulmisaryan, T.G., Gilyazetdinov, L.P. (1975) *Syrre dlya proizvodstva uglerodnykh pechnykh sazh* [Raw materials for furnace carbon black production], Khimiya, Moscow, Russia, 149 p.

Egorova, S.R. (2001) *Aromatizatsiya alifaticheskikh uglevodorodov s ispolzovaniem modifitsirovannykh tseolitsoderzhashchikh katalizatorov* [Aromatization of aliphatic hydrocarbons using modified zeolite-containing catalysts] PhD thesis in Chemical Sciences, 05.17.04, Kazan, Russia, 150 p.

Ivanovskiy, V.,I. (2004) *Tekhnicheskiy uglerod, Protsessy i apparaty* [Carbon black, Processes and equipment: Textbook], OAO "Tekhuglerod", Omsk, Russia, 228 p.

Kuznetsov, P.N., Safin, V.A., Avid, B., Kuznetsova, L.I., Purevsuren, B., Ismagilov, Z.R., (2021) *Termicheskoe rastvorenie ugley ryada metamorfizma v antratsenovoy fraktsii smoly koksovaniya: analiz korrelyatsionnykh svyazey s khimiko-tekhnologicheskimi svoystvami ugley* [Thermal dissolution of coals of different metamorphism stages in anthracene fraction of coking tar: analysis of correlations with chemical-technological properties of coals], *Khimiya tverdogo topliva*, no. 2, pp. 1-3.

Musina, N.S. (2014) *Razrabotka sposobov opredeleniya elementnogo i uglevodorodnogo sostava tyazhelykh neftyanykh ostatkov* [Development of methods for determining elemental and hydrocarbon composition of heavy oil residues] PhD thesis in Chemical Sciences: 02.00.02. Moscow, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, 186 p.

Mukhamedzyanova, A.A., Gimaev, R.N., Khaibullin, A.A., Telyashev, E.G. (2012 *Issledovanie kachestvennykh kharakteristik tyazheloy smoly piroliza* [Study of qualitative characteristics of pyrolysis heavy tar], *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, vol. 17, no. 2, pp. 909-915,

Pavlovich, O.N. (2006 *Sostav, svoystva i perspektivy pererabotki kamennougolnoy smoly* [Composition, properties and processing prospects of coal tar], Electronic textbook, Yekaterinburg, UGTU-UPO, Russia, 41 p.

Russian Federation (2023 *Natsionalnyy doklad o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbsii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom za 1990-2021 gg, v 2 tomakh* [National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol for 1990-2021 in 2 volumes], Moscow, Russia.

Ryabtsev, I.I., Volkov, A.E., (1968 *Proizvodstvo gaza iz zhidkikh topliv dlya sinteza ammiaka i spirtov* [Gas production from liquid fuels for ammonia and alcohol synthesis], Khimiya, Moscow, Russia, 207 p.

IPCC (2006 *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., (eds, Published IGES, Japan.

Intergovernmental panel on climate change – emission factor database, URL: www.ipcc-nggip.iges.or.jp.

Для цитирования / Forcitation

Бакурова, Э.Ю., Имшенник, Е.В., Нахутин, А.И. (2025) Разработка национального коэффициента выбросов диоксида углерода от производства технического углерода (сажи) на предприятиях Российской Федерации, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVI, № 3-4, с. 8-18, doi:10.21513/0207-2564-2025-3-4-8-18.

Bakurova, E Yu., Imshennik, E.V., Nakhutin, A.I.. (2025 Developing of national carbon dioxide emission factor from carbon black production at the enterprises of the Russian Federation, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXVI, № 3-4, с. 8-18, doi:10.21513/0207-2564-2025-3-4-8-18.

Методологические основы комплексных исследований лесных фитоценозов

Д.В. Лежнев^{1,2)}

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,
РФ, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

Институт лесоведения РАН,
РФ, 143030, Московская обл., Одинцовский г.о., с. Успенское, ул. Советская, д. 21

Адрес для переписки: *lezhnev.daniil@yandex.ru*

Реферат. В статье представлены методологические основы комплексных исследований лесных фитоценозов, направленных на оценку структурной организации, устойчивости и динамики лесных экосистем на постоянных пробных площадях. Описаны современные подходы к закладке и обследованию пробных площадей, включая классификацию ярусов растительности, методы инвентаризации древостоя, подроста, подлеска и живого напочвенного покрова. В статье рассмотрены современные подходы к лесной таксации с применением мобильных устройств, оснащенных LiDAR-модулями. Особое внимание уделено методам получения высокоточных биометрических параметров древесной растительности, а также сравнительной оценке эффективности и точности, достигаемой с помощью специализированного приложения Arboreal Forest. Подчеркивается значение комплексного подхода в изучении фитоценозов, включающего оценку вертикальной и горизонтальной структуры, сомкнутости полога, описание подроста, подлеска и флористического состава живого напочвенного покрова, а также использование математико-статистических методов при камеральной обработке данных. Подробно рассмотрены особенности учёта видов живого напочвенного покрова, в том числе с использованием платформы iNaturalist. Работа демонстрирует интеграцию традиционных полевых методов с новыми цифровыми технологиями, повышающими точность, скорость и воспроизводимость данных при мониторинге лесных экосистем.

Ключевые слова. Методология, полевые работы, лесные экосистемы, мониторинг, лесная таксация, биометрические характеристики деревьев, инвентаризация насаждений, постоянная пробная площадь, Arboreal Forest, iPhone LiDAR, iNaturalist.

Methodological foundations of complex studies of forest phytocenoses

D.V. Lezhnev^{1,2)}

¹⁾Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49, Timiryazevskaya str., 127434, Moscow, Russian Federation

²⁾Institute of Forest Sciences RAS,
21, Sovetskaya str., 143030, Uspenskoe, Moscow region, Russian Federation

Correspondence address: *lezhnev.daniil@yandex.ru*

Abstract. The article presents the methodological foundations of complex studies of forest phytocenoses aimed at assessing the structural organization, stability and dynamics of forest ecosystems on permanent sample plots. Modern approaches to the establishment and survey of sample plots are described, including the classification of vegetation layers, methods for inventorying the stand, undergrowth, understory and living ground cover. The article considers modern approaches to forest taxation using mobile devices equipped with LiDAR modules. Particular attention is paid to methods for obtaining high-precision biometric parameters of woody vegetation, as well as a comparative assessment of the efficiency and accuracy achieved using a specialized Arboreal Forest application. The importance of an integrated approach to the study of phytocenoses is emphasized, including an assessment of the vertical and horizontal structure, canopy density, a description of the undergrowth, understory and floristic composition of the living ground cover, as well as the use of mathematical and statistical methods in office data processing. The features of accounting for species of living ground cover are considered in detail, including using the iNaturalist platform. The work demonstrates the integration of traditional field methods with new digital technologies that improve the accuracy, speed and reproducibility of data when monitoring forest ecosystems.

Keywords. Methodology, field work, forest ecosystems, monitoring, forest taxation, biometric characteristics of trees, inventory of stands, permanent sample plot, Arboreal Forest, iPhone LiDAR, iNaturalist.

Введение

Лесные экосистемы – наиболее распространённые наземные экосистемы на планете. Они служат средой обитания для более половины известных видов растений и животных, выполняя ключевые функции в поддержании биосферы. Лесные фитоценозы представляют собой природные экосистемы, которые обеспечивают ряд важнейших услуг для человека. В основном выделяют следующие группы экологических функций лесных насаждений: средообразующие, защитные и стабилизирующие функции (Васильев, 2020; Lezhnev et al., 2025).

В настоящее время сложились особые условия для роста и развития лесных насаждений. На сегодняшний день важной проблемой остается сохранение длительно и эффективно функционирующих лесных фитоценозов. Актуален вопрос отклика лесных экосистем на значительное изменение экзогенных факторов (Глазунов и др., 2016; Черненькова и др., 2019; Дубенок и др., 2020; Коротков, 2023; Глазунов и др., 2024а).

Вместе с тем лесные фитоценозы являются частью биогеоценозов – более сложных природных систем, что важно учитывать при их изучении. Под структурой фитоценозов Т.А. Работнов (1992) понимает особенности размещения растений и их компонентов в пространстве и во времени. Структура характеризует объем среды, которая используется фитоценозом, а также особенности взаимодействия растительности со средой.

Структурная организация определяется составом и количественным соотношением компонентов растительных сообществ, условиями произрастания, а в эксплуатируемых человеком формой и интенсивностью воздействия на фитоценоз.

Важным признаком структуры лесных фитоценозов является степень сомкнутости растительности и особенность вертикального распределения, а также наличие или отсутствие нескольких ярусов.

В данный момент в науке существует две трактовки ярусности, исходя из жизненных форм видов, которые входят в состав ценозов и из расположения органов растений (Теоретические вопросы ..., 1971). Как правило, в современных исследованиях чаще применяют первый подход в ходе изучения структуры лесных фитоценозов.

Стоит отметить, что особенно четко ярусность наблюдается в лесах хвойно-широколиственной зоны, также значительную роль в определении структурной организации фитоценозов играет состав ценоэлементов, численность и жизненное состояние особей сосудистых растений (Работнов, 1992).

В современных исследованиях лесных экосистем рекомендуется использовать комплексный подход по изучению роста и производительности, а также структурной организации фитоценозов. Системный анализ позволяет рассматривать лесной фитоценоз как сложную систему, где все элементы взаимосвязаны и взаимодействуют между собой.

Применение комплексного подхода в современной лесной экологии позволяет дать оценку протекающих процессов, происходящих в лесах, прогнозировать состояние, оценивать параметры формирующихся насаждений.

Цель исследования – рассмотреть методологические подходы комплексного изучения основных ярусов лесных фитоценозов: древесный, древесно-кустарниковый и травяно-кустарничковый на постоянных пробных площадях в древостоях и на вырубках.

Задачи:

- проанализировать различные подходы при проведении полевых работ в насаждениях и на вырубках;
 - обосновать методологические подходы по проведению комплексных исследований структурной организации лесных экосистем;
-

– рассмотреть особенности сбора полевых данных с использованием мобильных устройств и их последующей обработки с использованием методов математической статистики.

Результаты и обсуждение

Методика комплексных исследований на постоянных пробных площадях в насаждениях. Постоянные пробные площади (ППП) закладываются на длительное время с целью изучения хода роста древостоев, изменения структурной организации или определения эффективности проведения различных лесохозяйственных мероприятий (рубки, внесение удобрений, осушительная мелиорация) (Пилипко, 2013).

Для этих целей подбирается однородный участок насаждения по количественным и качественным показателям, который характеризуется комплексом таксационных признаков. К ним относятся происхождение, форма, состав, возраст, средний диаметр и средняя высота, класс бонитета, тип леса, полнота, запас древесины и ряд других показателей.

Особенное значение имеют многолетние стационарные исследования на одних и тех же ППП, так как непрерывность получения данных позволяет объективно оценить динамику протекающих сукцессионных изменений в лесных фитоценозах (Абатуров, Меланхолин, 2004; Быков, 2008; Lezhnev et al., 2024).

Место расположения постоянной пробной площади выбирается в части древостоя однородного по всем таксационным показателям и условиям местопроизрастания, не ближе, чем 30 м от широких квартальных просек, дорог, опушек леса, вырубок и иных не покрытых лесом площадей.

Пробная площадь прямоугольной формы огораживается визирами. Иногда эффективно прокопать канавку глубиной 20-30 см по периметру ППП, это позволит закрепить границы на длительное время. Общая площадь ППП зависит от количества деревьев преобладающей породы. На пробной площади, заложенной в молодняках, должно быть не менее 400 деревьев, в приспевающих и средневозрастных – не менее 300, в спелых – не менее 200, в перестойных – не менее 150 деревьев главной породы. Указанное количество деревьев необходимо для получения достоверной информации и получения результатов с высокой достоверностью. При этом в молодняках рекомендуется пробные площади закладываются размером не менее 0.25 га.

Все деревья на постоянной пробной площади нумеруются масляной краской или наносятся ламинированные таблички с присвоением каждому дереву индивидуального номера. Для этого на высоте 1.3-1.5 м очищают место под номер или подрумянивают грубую кору (без повреждения луба). После этого на каждом наносят по трафарету номер дерева и отмечают высоту 1.3 м от шейки корня горизонтальной линией (рис. 1).

Обследование лесных экосистем, как правило, проводится по общепринятой лесоводственно-таксационной методике, в соответствии с требованиями ОСТ 56-69-83 «Пробные площади лесоустойчивые. Методы закладки»,

однако не всегда получается выполнить показатель по количеству деревьев главной породы, так как размер фитоценоза ограничен или момент закладки ППП был осуществлен ранее, чем вышли данные отраслевые стандарты.

А

Б



Рисунок 1. Общий вид древостоев на постоянных пробных площадях с нанесением на деревьях индивидуальных номеров: масляной краской (А), ламинированными табличками (Б)

Figure 1. General view of tree stands on permanent trial plots with individual numbers applied to trees: with oil paint (A), laminated plates (B)

Пробные площади различаются по форме: четырехугольные, ленточные и круговые. Основной формой пробных площадей, на которых производятся наиболее полные измерения, являются прямоугольные и квадратные.

Отграничение прямоугольных и квадратных пробных площадей в натуре производится инструментально с замером углов и сторон. Пробные площади отграничиваются визирами шириной до 0.5 м с нанесением на граничных деревьях пометок краской. По углам пробной площади устанавливают информационные знаки с указанием номера пробной площади, лесного квартала и лесотаксационного выдела, а также фиксируют координаты их местоположения с помощью специальных приборов (Приказ..., 2022). Для обеспечения необходимого количества деревьев пробу ограничивают визирами с трёх сторон, а четвёртую закрывают после перечёта, то есть, когда наберется нужное количество деревьев.

При закладке круговых ППП радиус заложения определяется в зависимости от густоты древостоя, как правило, площадь 0.3 га позволяет набрать

необходимое количество деревьев основного элемента леса. Однако, при изучении старовозрастных лесных экосистем (возраст более 150 лет), рекомендуется брать размер площади не менее 0.5 га. Круговые ППП постоянного радиуса обычно имеют небольшие размеры (радиус до 25-30 м), что обеспечивает достижение наибольшей однородности древостоя в пределах ППП, имеющей важное значение для точности и чистоты эксперимента.

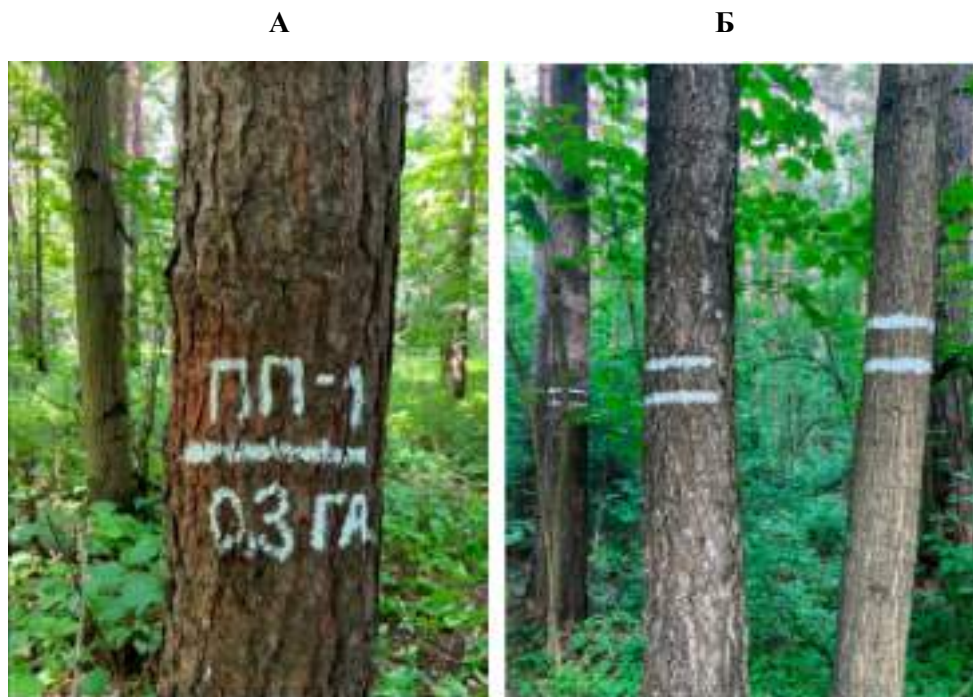


Рисунок 2. Общий вид на круговых постоянных пробных площадях: с нанесением на центральном дереве номера и размера пробной площади (А), с нанесением границ круговой пробной площади на деревьях (Б)

Figure 2. General view of circular permanent trial plots: with the number and size of the trial plot marked on the central tree (А), with the boundaries of the circular trial plot marked on the trees (Б)

При закладке круговой постоянной пробной площади отбирается здоровое, без механических повреждений и существенного наклона центральное дерево главной породы. На центральном дереве наносится первый порядковый номер, год закладки ППП, на обратной стороне ствола – номер и общая площадь ППП. Границы пробной площади отмечаются двумя горизонтальными линиями на деревьях, которые не входят в пробную площадь (рис. 2).

Древостой. После отбивки границ ППП начинается этап сплошного перечета деревьев с диаметром 6 см и более с точностью до 0.1 см. Перечет деревьев на высоте 1.3 м можно осуществлять двумя способами: с использованием мерной вилки – измерения осуществляются в двух направлениях (С-Ю; З-В) с последующим расчетом среднего диаметра или мерной лентой через длину окружности ствола с последующим расчетом диаметра ствола (рис. 3).



Рисунок 3. Определение среднего диаметра ствола на высоте 1.3 метра с использованием мерной ленты

Figure 3. Determining the average trunk diameter at a height of 1.3 meters using a measuring tape

Измерение высот модельных деревьев осуществляется высотомером или с применением приложения Arboreal Forest после завершения сплошного пере-
чета деревьев: для главного яруса 20-30 модельных деревьев и 10-20 деревьев
сопутствующего яруса по каждой породе (при наличии) для определения
дальнейшего определения средней высоты (рис. 4).



Рисунок 4. Измерение высот на пробной площади с использованием Haglof Vertex III

Figure 4. Measuring elevations on a test plot using the Haglof Vertex III

По форме насаждения различают: простые – одноярусные и сложные – двух-трехъярусные. Чаще всего встречаются двухъярусные насаждения, особенно в зоне хвойно-широколиственных лесов. Главным считается ярус, который имеет больший запас на 1 га (Загребев и др., 1992).

Выделение ярусов проводится по разнице в средних высотах по элементам леса с определением их основных таксационных характеристик (Сукачев, Зонн, 1961; Корчагин, 1976). Например, в смешанных лесах первый ярус выделяется по светолубивой хвойной породе: сосна и лиственница.

Второй ярус в насаждениях выделяется в следующих случаях:

- полнота каждого яруса должна быть не менее 0.3;
- разница в средних высотах ярусов должна составлять не менее 20%;
- при высоте нижнего яруса от 4 до 8 м ярус выделяется, если его средняя высота составляет не менее 1/4 высоты первого яруса.

Однако в ходе фитоценологических исследований второй ярус может выделяться без учета показателя полноты (Лежнев, Лебедев, 2023; Глазунов и др., 2024a; Korotkov et al., 2023).

Во время перечета деревьев также проводится глазомерная оценка жизненного состояния деревьев и распределение их по категориям санитарного состояния в соответствии с утвержденным «Порядком проведения лесопатологических обследований...» по 5 бальной шкале (Приказ..., 2020).

Следующим этапом проведения полевых работ в древостоях является отбор кернов древесины возрастным буравом у модельных деревьев в количестве 5-10 штук из различных ступеней толщины на высоте около 0.2-0.3 м с целью определения возраста насаждений (Глазунов и др., 2024). В древостоях сложных по форме также необходимо отбирать по несколько кернов из разных ступеней толщины у каждой древесной породы сопутствующего яруса, для определения возрастной структуры древесного яруса фитоценоза в целом (рис. 5).

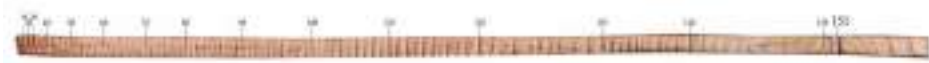


Рисунок 5. Возрастной керн сосны, отобранный на постоянной пробной площади

Figure 5. Age core of Scots pine collected from a permanent sample plot

Важно отметить, что на сегодняшний день в Российской Федерации существует высокая потребность в актуальной информации о количественных и качественных характеристиках насаждений на землях лесного фонда и городских озелененных территориях. Для удовлетворения этой потребности необходимы инновационные подходы к методам лесной таксации, нацеленным на повышение темпов и точности при сборе, обработке и анализе таксационной информации (Роувинен, 2014).

Совершенствование методов инвентаризации лесных насаждений, позволяет обеспечивать устойчивое управление лесами (Honkavaara et al., 2016). Классические полевые методы инвентаризации связаны с высокой трудоемко-

стью и значительными временными затратами, а также подвержены субъективным ошибкам в измерениях (Liang et al., 2016).

Одним из ключевых вопросов при проведении лесоустроительных работ и лесной таксации становится поиск способов увеличения результативности натурных работ. Развитие мобильных технологий сегодня способствует более объективному и точному измерению таксационных показателей, так как позволяет собирать первичные данные в цифровом формате и оперативно обрабатывать их в последующем.

Для высокоточной фиксации биометрических характеристик деревьев в последние годы разрабатывается широкая линейка специализированного программного обеспечения для смартфонов, в том числе с внедренными LiDAR-модулями.

Несмотря на то, что соответствующие мобильные приложения для учета древостоев и отдельных древесных растений пока еще находятся на стадии апробации, становится необходимым соотносить их результаты с информацией, получаемой классическими методами измерений в таксационной практике (Лебедев, 2023).

Альтернативным направлением, которое набирает обороты в лесоинвентаризационных исследованиях, выступают технологии наземного лазерного сканирования. Данный метод позволяет определять пространственную структуру насаждений и вычислять основные таксационные характеристики на основе трехмерных облаков точек (Кабонен, Иванова, 2023; Proudman et al., 2022), обеспечивая высокую степень детальности (Gollob, 2019).

Прикладное использование LiDAR-датчиков, интегрированных в мобильные устройства (телефоны и планшеты), для измерения основных морфометрических показателей деревьев активно развивается (Лебедев, 2023; Woo et al., 2021). Достоинства данного подхода связаны с оперативностью проведения полевых изысканий и мобильностью оборудования (Sandim et al., 2023), что особенно ценно при условии больших объемов работ или отдалённости территорий обследования.

Наиболее ярким примером такого решения является шведская разработка Arboreal Forest, совместимая исключительно с Apple-устройствами (iPhone, iPad), оснащенными LiDAR. Данное приложение позволяет осуществлять учет диаметра стволов на круговых пробных площадях, с помощью линейных маршрутов (трансектов), а также на произвольно определяемых участках (рис. 6).

Внедрение мобильных приложений для лесной таксации, в том числе биометрических измерений, способно существенным образом преобразовывает традиционные способы инвентаризации. Ряд исследователей (Pace et al., 2022; Sandim et al., 2023) указывает на высокую сопоставимость данных о таксационных признаках, полученных посредством Arboreal Forest, и информации, зафиксированной при помощи общепринятых таксационных приборов. Погрешность, выраженная в абсолютном отклонении диаметра деревьев, не превышала 5-7% для большинства случаев. При этом у крупных экземпляров иногда фиксировалось занижение размеров ствола, что может объясняться

особенностями отражения лазерного сигнала или ошибками распознавания границ ствола в условиях сильной затененности под пологом леса.

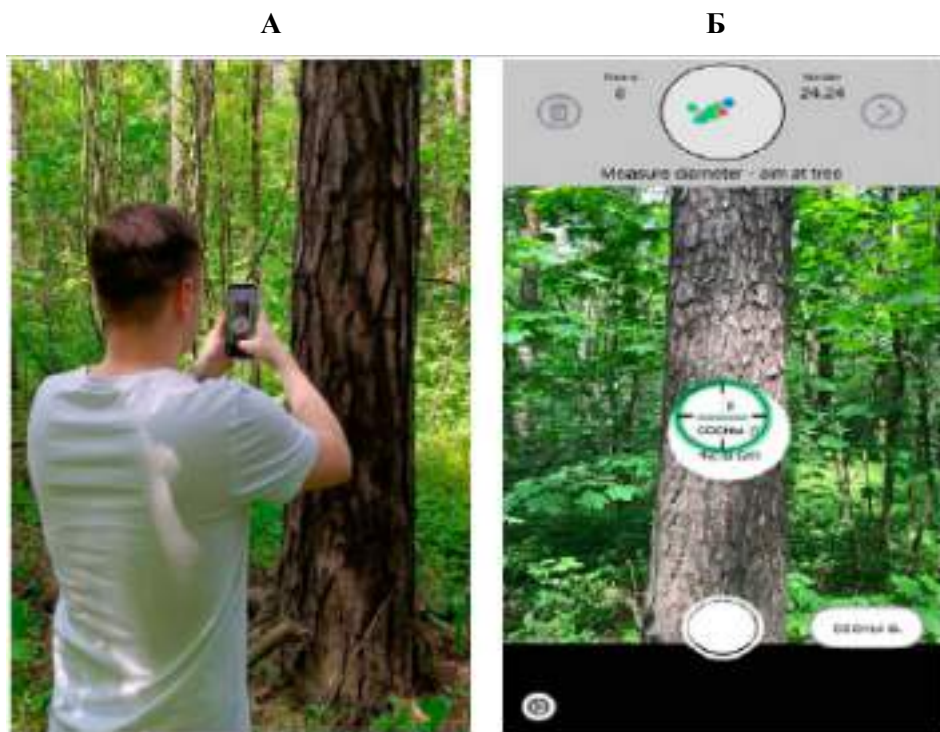


Рисунок 6. Измерение диаметра ствола сосны с использованием смартфона (А), интерфейс приложения Arboreal Forest в режиме перечета деревьев (Б)

Figure 6. Measuring the diameter of a pine tree using a smartphone (A), Arboreal Forest application interface in the menu for selecting the size of the sample plot (B)

При этом отмечается тенденция к небольшому занижению диаметров у деревьев крупных размеров. Тем не менее, расхождения с результатами классических измерений, например, при использовании мерной вилки, остаются в пределах допустимой погрешности (Лебедев, 2023).

Подрост и подлесок. Одним из важных элементов лесного фитоценоза является древесно-кустарниковая растительность нижних ярусов (подрост и подлесок). Наблюдение за ходом естественного возобновления под пологом древостоев позволяет глубже понять роль подроста в сохранении устойчивости и повышении продуктивности насаждения (Лежнев, 2024).

Кроме сохранения биоразнообразия, подрост и подлесок также может играть важную функциональную роль, регулируя естественные процессы в экосистеме, например, посредством влияния на лесообразовательный процесс (George, Bazzaz, 2014; Muller, 2014; Elliott et al., 2015; Thrippleton et al., 2018).

Подрост и подлесок активно реагируют на изменения в условиях освещенности и интенсивности рекреационного воздействия. В последнее время в центре внимания все чаще оказываются изменения в сообществах нижнего

яруса, вызванные изменением климата, наряду с последствиями увеличения инвазионных видов (Bertrand et al., 2011; Peebles-Spencer et al., 2017).

Наблюдение за ходом естественного возобновления под пологом древостоев, позволяет глубже понять роль подроста в сохранении устойчивости и повышении продуктивности насаждения (Беляева и др., 2012). Нижние ярусы насаждений являются важными с точки зрения биоразнообразия лесов умеренного пояса, которые имеют в среднем около 80% разнообразия сосудистых растений (Gilliam, 2007).

При пересчете не следует смешивать подрост с основным древостоем. К подросту относится молодое поколение леса, которое со временем может заменить основной древостой, но во время таксации имеет высоту менее 1/4 средней высоты основного яруса.

Для определения количественной и качественной характеристики нижних ярусов древесно-кустарниковой растительности фитоценозов выполняется закладка учетных площадок размером 25 м^2 , в количестве 5 шт., расположенных методом «конверта» (рис. 7).

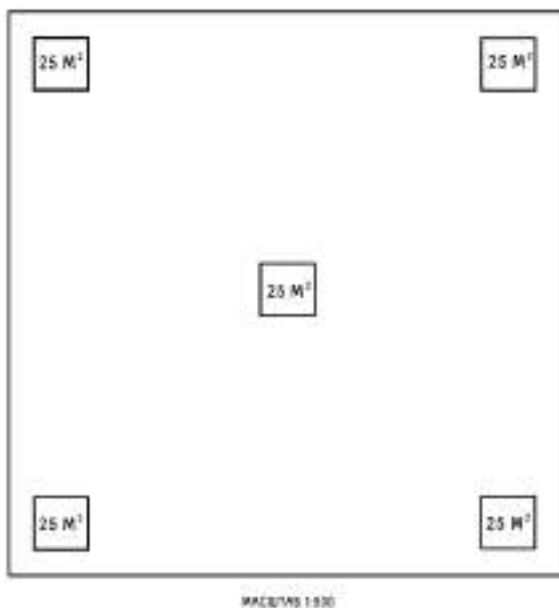


Рисунок 7. Расположение учетных площадок для изучения подроста и подлеска на постоянной пробной площади

Figure 7. Location of survey plots for studying undergrowth and understory on a permanent sample plot

Учётные работы по определению подроста осуществляли отдельно по породам, жизненному состоянию (жизнеспособные, нежизнеспособные и сухие). У каждого дерева на учетной площадке измеряют высоту с точностью до 1 см с последующим распределением их по категориям крупности. При этом к категории мелкого относят растения высотой от 0.1 до 0.5 м, среднего –

от 0.6 до 1.5 м, крупного – высотой более 1.5 м (Загребев и др., 1992; Дубенок и др., 2024; Лежнев, Коротков, 2024).

Живой напочвенный покров. Одним из основных компонентов лесных фитоценозов и важным источником многообразия растительного покрова является травяно-кустарниковый ярус (Уфимцев и др., 2018; Лежнев, Меняева, 2023а). Фитоценотическая роль живого напочвенного покрова в лесных экосистемах очень существенна. Принимая участие в биологическом круговороте веществ, он аккумулирует в собственной фитомассе значительную долю влаги и элементов минерального питания (Корчагин, Лавренко, 1964; Чижов, 2003; Лежнев, Меняева, 2024).

Флористический состав, структура, количественные и качественные показатели, травянистого яруса используются в качестве одного из диагностических показателей влияния ряда факторов на лесные фитоценозы. Соотношение экологических групп травянистого яруса могут использоваться для определения состояния лесных фитоценозов (Дубенок и др., 2023; Коновалова, Коновалов, 2023).

Травяно-кустарниковый ярус является наиболее мобильным компонентом лесного фитоценоза, быстро реагируя на изменение локальных экологических условий, в том числе антропогенное воздействие. В городах флористические и эколого-ценотические особенности живого напочвенного покрова служат индикатором степени рекреационного воздействия (Кузнецов и др., 2015; Беляева и др., 2015; Коротков, Ухов, 2021; Коротков и др., 2024).

При характеристике количественного участия видов в фитоценозе, как правило, используют одну из основных шкал обилия видов Ж. Браун-Бланке или О. Друде, однако зачастую в современных исследованиях предпочтение отдается последней (Коротков, 2023; Тихонова и др., 2023; Криницын и др., 2024).

При описании живого напочвенного покрова в лесных экосистемах фиксируют общие характеристики: дату, географическое положение, рельеф, тип почвы и условия местопрорастания, а также описание фитоценоза. В пределах пробной площади размещают не менее 10 учетных площадок размером 1 м² (при высокой видовой насыщенности) или 4 м² (при низкой), расположенных по диагонали на равных расстояниях и отмеченных на местности. Каждая учетная площадка описывается на специальном бланке, содержащем сведения о номере, дате, микрорельефе и степени задернения, а также – о растительном покрове. В случаях упрощенного исследования пробная площадь выбирается визуально в наиболее типичном месте, без закладки учетных площадок, с последующим составлением флористического списка методом диагонального обхода (Терехина, 2022; Румянцев и др., 2023).

На постоянных пробных площадях определяется также обилие каждого вида травянистой растительности. Обилие – это количество экземпляров или наземных побегов конкретного вида растения на единице площади. Этот показатель является важным характеристическим признаком любого фитоценоза и отражает плотность популяций входящих в его состав видов (Хромова, 2022). Оценка обилия, как правило, осуществляется визуально (глазомерно).

Такая оценка проводится с использованием специальных шкал, наиболее распространенной из которых является шкала О. Друде (табл. 1) (Беляева и др., 2009).

Таблица 1. Шкала Друде для оценки обилия вида в фитоценозе

Table 1. Druce Scale for estimating species abundance in the phytocenoses

№	Обозначение	Проективное покрытие, %	Описание обилия
1	Socialis (Soc)	> 90	Растения образуют сплошной ковёр, надземные части смыкаются
2	Copiosus (Cop3)	70-90	Растения представлены очень обильно
3	Copiosus (Cop2)	50-60	Растения представлены обильно
4	Copiosus (Cop1)	30-40	Растения представлены довольно обильно по окраине
5	Sparsus (Sp)	10-20	Растения представлены обильно, но сплошного покрова не образует
6	Solitarius (Sol)	3-5	Несколько растений
7	Unicum (Un)	< 1	Единичное растение

Общее проективное покрытие живого напочвенного покрова – это проекция частей растения вида на поверхность почвы, выраженная обычно в процентах от общей площади. Покрытие характеризует массу ценотических популяций различных видов и зависит от развития надземной части растений.

Встречаемость видов в фитоценозе отражает характер их распределения по площади. Для учета встречаемости в пределах пробной площади равномерно закладывают до 30 учетных площадок 1×1 м, на которых регистрируют все присутствующие виды. Вначале составляют общий флористический список растений изучаемого яруса и после завершения учета на всех площадках рассчитывают коэффициент встречаемости каждого вида по формуле:

$$R = \frac{a}{n}, \quad (1)$$

где:

a – число учетных площадок, на которых обнаружен данный вид;

n – общее число учетных площадок.

Для определения видов сосудистых растений на постоянных пробных площадках можно использовать приложение для смартфонов iNaturalist, которое является важным инструментом при проведении геоботанических изысканий. Благодаря высокой мобильности и доступности смартфонов, исследователи могут в реальном времени фиксировать наблюдения в различных природных условиях. iNaturalist позволяет загружать фотографии растений, которые

затем анализируются с помощью встроенной системы искусственного интеллекта и базы данных сообщества (Захаров, 2023; Seregin et al., 2020).

Данное приложение значительно ускоряет процесс идентификации и повышает его точность, особенно для начинающих специалистов. Автоматическая геолокация наблюдений позволяет фиксировать местоположение видов, что важно для картирования их распространения и отслеживания изменений в динамике популяций растений (Захаров, 2025). Использование платформы iNaturalist на мобильных устройствах упрощает процесс определения видов, позволяет начинающим специалистам принимать участие в геоботанических исследованиях и способствует сбору больших объемов данных о растительном мире (Chamberlain et al., 2022; La Sorte et al., 2022).

Камеральная обработка данных. Полная и окончательная обработка полевых материалов производится в камеральных условиях. Она начинается с обработки ведомости полевых работ.

По данным перечёта и обмера деревьев вычисляются таксационные показатели древостоя пробной площади: средний диаметр, средняя высота, полнота, запас и другие характеристики насаждения.

Средний диаметр насаждения определяется как среднеарифметическая величина диаметров на высоте 1.3 м деревьев, у которых измерялись высоты. Более точно он может быть определен как средневзвешенная величина количества деревьев по ступеням толщины, полученная в результате сплошного перечёта при таксации леса.

Для определения средней высоты элемента леса по данным измеренных модельных (учетных) деревьев строят график высот, где по оси абсцисс откладывают ступени толщины, а по оси ординат – высоты (рис. 8). Ордината, соответствующая среднему диаметру, и есть средняя высота элемента леса. Более точно средняя высота определяется как средневзвешенная их средних высот отдельных ступеней толщины по формуле:

$$H_{cp} = \frac{\sum h \cdot G}{\sum G}, \quad (2)$$

где

h – средняя высота n -й ступени толщины;

G – площадь сечения n -й ступени толщины;

$\sum G$ – сумма площадей сечений элемента леса.

Средний возраст элемента леса определяется как среднеарифметическая 5-10 измерений по кернам деревьев, близких по размерам и среднему.

Класс бонитета определяется для насаждения в целом по средней высоте и среднему возрасту основного элемента леса по шкале М.М. Орлова (1931).

Полнота насаждения бывает абсолютная и относительная. Абсолютная полнота выражается в $\text{м}^2/\text{га}$ как общая сумма площадей сечений, составляющих его деревьев на высоте 1.3 м или деревьев яруса леса. В таксационной практике чаще применяется относительная полнота, выраженная в долях единицы. Относительная полнота элемента леса определяется как частное от

деления суммы площадей сечений на 1 га на площадь сечения нормального (с полнотой 1.0) насаждения того же возраста и класса бонитета, взятого из местных таблиц хода роста или из стандартных таблиц сумм площадей сечения и запасов для соответствующей высоты и класса бонитета. Общая относительная полнота яруса (насаждения) определяется как сумма всех полнот составляющих ярус элементов леса.

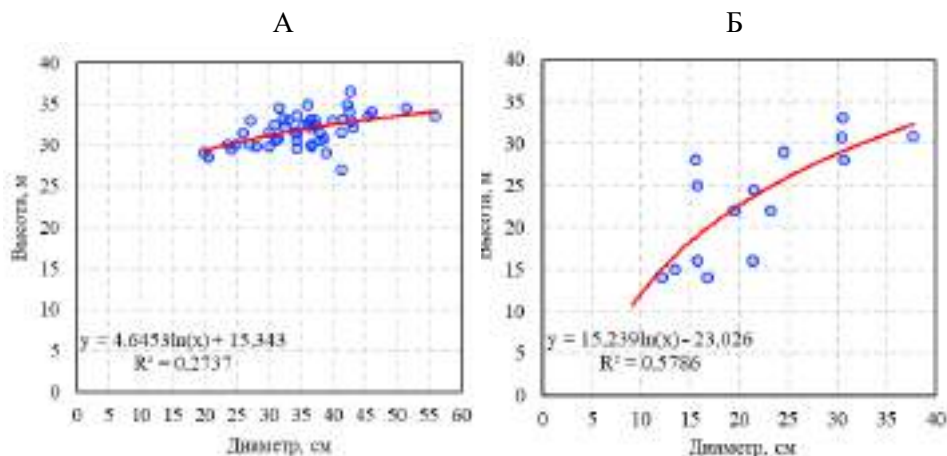


Рисунок 8. График высот главной породы (А) и сопутствующей (Б) в сосновом древостое

Figure 8. Graph of the heights of the main rock (A) and the accompanying (B) in the pine stand

При глазомерно-измерительном способе таксации лесов запас древесины определяется по сумме площадей поперечного сечения стволов деревьев, определенной на ППП, и средней высоте по таблицам, входящих в состав нормативно-справочной информации по следующей формуле:

$$M = G \cdot H \cdot F, \quad (3)$$

где:

M – запас древостоя на 1 га, в m^3 ;

G – среднее арифметическое значение суммы площадей поперечного сечения стволов деревьев на 1 га по данным измерений на ППП, м;

H – средневзвешенная по коэффициентам состава высота деревьев в насаждении (ярусе), м;

F – среднее видовое число, значение которого вычисляется по таблицам, применяемым для корректировки запасов древесины.

В смешанных лесах общий запас древостоя определяется как сумма запасов всех составляющих его пород. Деревья с индивидуальными обмерами диаметров группируются в ступени толщины отдельно по породам и качественным категориям годности. Ступень толщины принимается в зависимости от среднего диаметра древостоя: при среднем диаметре до 6 см ступень толщины принимается равной 1 см, при среднем диаметре от 7 до 15 см – 2 см и более 16 см – 4 см. В древостоях со средним диаметром более 16 см перечень начинается со ступени толщины 8 см (табл. 2).

Таблица 2. Распределение диаметров деревьев по ступеням толщины
Table 2. Distribution of tree diameters by thickness steps

Шаг ступени толщины, см	Средний диаметр древостоя	Степень толщины, см	Диапазон диаметра, см
1	≤ 6.0 см	1	0.6-1.5
		2	1.6-2.5
		3	2.6-3.5
		4	3.6-4.5
		5	4.6-5.5
2	от 7.0 до 16.0 см	2	1.0-2.9
		4	3.0-4.9
		6	5.0-6.9
		8	7.0-8.9
		10	9.0-10.9
4	> 16.0 см	8	6.0-9.9
		12	10.0-13.9
		16	14.0-17.9
		20	18.0-21.9
		24	22.0-25.9

В ходе обработки результатов перечета строятся графики, которые отображают высотную структуру с разделением древостоя на ярусы (рис. 9), а также горизонтальную структуру с распределением числа деревьев по ступеням толщины (рис. 10).

По результатам сплошного перечета деревьев вычисляют средний диаметр, среднюю высоту, полноту, запасы по элементам леса, по соотношению которых изучается породный состав и вертикальная структура древостоев. Для характеристики вертикальной структуры насаждений высота первого яруса принимается равной средней высоте главного элемента леса (например, в сосняках – сосна, в лиственничниках – лиственница). Выделяется фитоцено- тический второй ярус, к которому относятся деревья, высота которых состав- ляет менее 80% от средней высоты первого яруса.

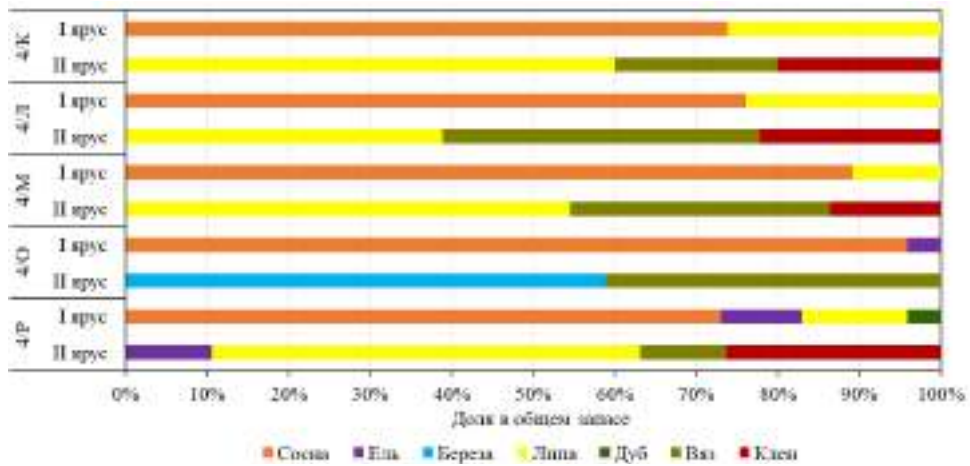


Рисунок 9. Вертикальная структура двухъярусных древостоев на ППП

Figure 9. Vertical structure of forest stands on the POP

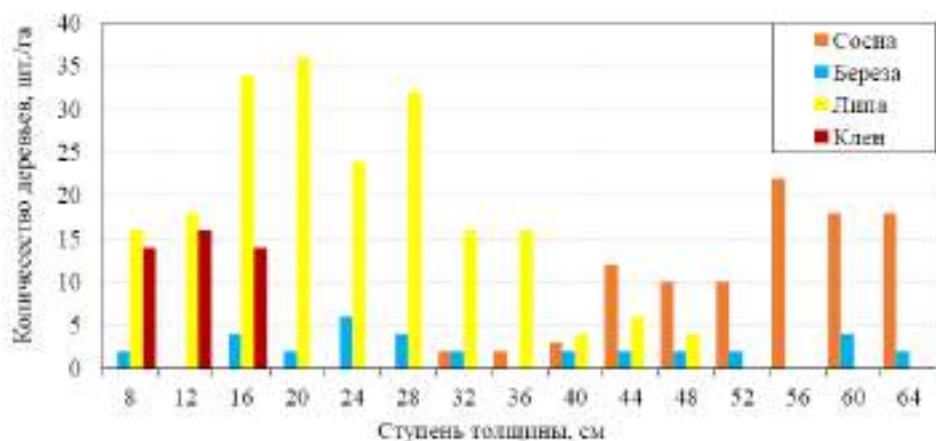


Рисунок 10. Распределение деревьев по четырехсантиметровым ступеням толщины

Figure 10. Distribution of trees by four-centimeter thickness steps

Традиционным способом характеристики структуры насаждений по диаметру является распределение деревьев по ступеням толщины. По мере увеличения возраста насаждения ряды распределения деревьев по диаметру, как правило, растягиваются. Из-за уменьшения числа деревьев в насаждении график становится более плоским. Двухвершинный график возникает в случае разделения насаждения на главный и подчиненный полог, например, после подселения подроста под основной полог и его выхода во второй ярус (рис. 9).

Распределение деревьев по ступеням толщины в смешанных насаждениях, состоящих из светолюбивых и теневыносливых пород, также характеризуется двух- или многовершинными кривыми (Киселева и др., 2012).

При анализе живого напочвенного покрова таксономическая принадлежность названия видов сосудистых растений приводятся по П.Ф. Маевскому (2014). Адвентивные виды определяются в соответствии с региональными сводками такой флоры, например, для Московского региона можно использовать сводку С.Р. Майорова с соавторами (2012). Для оценки экосистемного и структурного разнообразия растительного покрова виды живого напочвенного покрова дифференцируют по эколого-ценотическим (Список сосудистых..., 2006) и фитоценотическим группам (Жмылев и др., 2021).

Систематический анализ флоры заключается в определении её состава: составляются флористические списки основных таксонов – видов, родов, семейств (табл. 3). Данный подход позволяет сформировать флористические спектры, в которых семейства ранжируются по количеству представленных в них видов или родов, выраженному в процентах от общего числа таксонов соответствующего уровня (Румянцев и др., 2023).

Таблица 3. Таксаномическое разнообразие живого напочвенного покрова

Table 3. Taxonomic diversity of the live ground cover

№	Название семейства		Число родов	Число видов	% от общего числа видов
	русское	латинское			
1	Розовые	<i>Rosaceae</i>	4	6	20.7
2	Астровые	<i>Asteraceae</i>	5	5	17.3
3	Яснотковые	<i>Lamiaceae</i>	4	4	13.8
4	Лютиковые	<i>Ranunculaceae</i>	3	4	13.8
5	Бальзаминовые	<i>Balsaminaceae</i>	1	3	10.3
6	Злаковые	<i>Poaceae</i>	3	3	10.3
7	Зонтичные	<i>Apiaceae</i>	2	2	6.9
8	Сложноцветные	<i>Compositae</i>	2	2	6.9
Итого			24	29	100

Анализ флористических спектров способствует выявлению различий в структурных особенностях растительных сообществ в различных географических регионах, а именно – определению доминирующих семейств, что зависит от их таксаномического богатства и распространенности.

Методика исследования естественного возобновления на вырубках. Лесные фитоценозы формируются различными способами, в том числе в результате катастрофических нарушений. Их внешний облик определяется характером протекающих сукцессионных процессов. Изучение динамики развития таких сообществ позволяет прогнозировать рост и развитие древесной растительности в различных условиях и использовать эти данные для решения практических задач. Особый интерес представляет динамика восстановления фитоценозов на начальных стадиях их формирования, поскольку именно на этом этапе закладываются основные направления развития сообщества после проведения сплошной рубки (Глазунов и др., 2024б).

После таких нарушений, как ветровалы, пожары или сплошные рубки, резко меняются экологические условия. Изменение светового режима способствует быстрой смене живого напочвенного покрова. Характер и степень влияния травянистых растений на естественное восстановление зависят от их видового состава и проективного покрытия. Важно определить направление восстановления леса на месте погибших насаждений после катастрофических явлений (Киселева, 2019; Лежнев и др., 2023).

При изучении восстановительной динамики древесно-кустарниковой растительности на вырубках после сплошной санитарной рубки определяется: возраст, высота, вертикальная структура и количество древесно-кустарниковой растительности в шт./га, встречаемость и благонадежность подроста на круговых площадках и прирост осевого побега в высоту у хвойных пород.

Для учета численности подроста и подлеска на вырубках закладываются круговые учетные площадки с постоянным радиусом 1.78 м (площадь 10 м²) (Лежнев, 2022). Учетные площадки располагаются по направлению ходовых линий от стены леса до противоположной стены леса (рис. 11).



Рисунок 11. Расположение учетных площадок на ходовых линиях на вырубке

Figure 11. The location of the accounting platforms on the running lines at the cutting

Количество площадок зависит от размеров вырубки. При оценке жизнеспособности подроста используют количественные и качественные показатели: цвет хвои, протяженность кроны и доля сухих ветвей. В основном, учитывают только жизнеспособные особи с подразделением его по категориям крупности (Грязькин, 2001).

Учет количества и измерение высот у всех древесных и кустарниковых растений осуществляют на каждой учетной площадке. Дополнительно определяется флористический состав травянистой растительности, обилие видов, а также общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса и каждого вида отдельно по общепринятым геоботаническим шкалам.

Камеральная обработка данных. В ходе исследования на вырубках определяется общее количество подроста в переводе на крупный, средняя численность на учетной площадке, ошибка средней численности, среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации, показатель точности наблюдений и коэффициент гомогенности по следующим формулам:

Общее количество подростка, шт./га (Мга):

$$M_{га} = K_j = \frac{\Sigma N \cdot 10000}{n \cdot S}, \quad (4)$$

где:

ΣN – общее количество подростка на учетных площадках с учетом коэффициентов перевода,

n – количество учетных площадок,

S – площадь площадки (10 м²).

Итоговое количество подростка с учетом перевода мелкого и среднего в крупный, шт.:

$$\Sigma N = 0.5 \Sigma N_m + 0.8 \Sigma N_{cp} + 1.0 \Sigma N_{kp}, \quad (5)$$

где:

N_m – количество мелкого подростка, шт.;

N_{cp} – количество среднего подростка, шт.;

N_{kp} – количество крупного подростка, шт.

Коэффициент встречаемости τ , %

$$\tau = \frac{n_1}{n} \cdot 100, \quad (6)$$

где:

n_1 – количество круговых площадок с наличием подростка.

Ошибка репрезентативности среднего количества подростка, шт.:

$$M_m = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (7)$$

Выборочное среднеквадратическое отклонение σ , шт.:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M_{уч.пл.})^2}{n - 1}}, \quad (8)$$

Фактический коэффициент вариации v , %, характеризующий разброс (рассеивание) измеряемой величины относительно среднего значения:

$$v = \frac{\sigma}{M_{уч.пл.}} \cdot 100. \quad (9)$$

Результат исследования оценивается показателем точности наблюдений. Показатель точности наблюдений P , %:

$$P = \frac{v}{\sqrt{n}}. \quad (10)$$

Для исследований лесных экосистем точность наблюдения является удовлетворительной, если значение находится в пределах 10-15% (Мартынов, 1996; Мандрыкин, 2019).

Коэффициент гомогенности (КГ) характеризует размещение подроста по исследуемой площади:

$$KG = \frac{\sigma^2}{M_{\text{уч.пл.}}}. \quad (11)$$

Для изучения высотной структуры основных лесообразующих пород на вырубках производили расчет редуционных чисел (R_h) по следующей методике:

- построение ранжированного ряда по высотам от минимальной до максимальной;
- разделение полученного ряда на 10 классов с одинаковым числом экземпляров в классе;
- определение средней высоты каждого класса: $h_{cp}(n)$;
- определение относительной высоты каждого класса:

$$R_h(n) = \frac{h_{cp}(n)}{h_{cp}}, \quad (12)$$

где $h_{cp}(n)$ – средняя высота каждого класса,

h_{cp} – средняя высота всех классов,

- расчет показателя ΔR_h как разницы относительной высоты 1 и 10 классов:

$$\Delta R_h = \Delta R_h(10) - R_h(1), \quad (13)$$

где:

$R_h(10)$ – редуционное число десятого класса,

$R_h(1)$ – редуционное число первого класса.

Оценка сходство видового состава сообществ на вырубках проводится с использованием коэффициента флористической общности Жаккара (K_j), который вычисляется по формуле (Миркин, Розенберг, 1978; Уланова и др., 2023):

$$K_j = \frac{N_{A+B}}{(N_A + N_B - N_{A+B})}, \quad (14)$$

где:

N_{A+B} – число общих видов в сравниваемых описаниях А и В,

N_A и N_B – число видов в каждом из описаний.

Обработку результатов, полученных в ходе полевых работ необходимо осуществлять с использованием математико-статистических методов анализа, применяемых в естественных науках. Все статистические выводы должны соответствовать $p = 0.05$. Полевые материалы, собранные на ППП в ходе исследований, в последующем обрабатываются с применением компьютерных программ «STATISTICA» и «Microsoft Excel».

Заключение

Важно отметить необходимость комплексного подхода при изучении лесных экосистем: сочетание полевых работ с современными цифровыми технологиями и использованием методов математической статистики (описательная статистика, корреляционный и регрессионный анализ, методы проверки статистических гипотез), применяемых в естественных науках. Такой подход способствует более точной оценке состояния лесов, прогнозированию их развития и принятию обоснованных управленческих решений для обеспечения устойчивого развития.

Особое значение приобретает внедрение инновационных технологий: мобильных приложений с LiDAR-модулями и наземного лазерного сканирования. Эти методы значительно повышают точность и эффективность сбора первичных данных, сокращая трудозатраты и минимизируя субъективизм измерений. Примеры таких решений, как Arboreal Forest, демонстрируют перспективы автоматизации лесной инвентаризации и мониторинга.

Анализ научной литературы и функционала современных мобильных приложений показал, что лидарная съемка с помощью встроенных в мобильных устройствах сенсоров позволяет получать точность измерений высоты и диаметра деревьев на уровне 90-95% относительно эталонных данных (Лебедев, 2023; Carle et al., 2017).

Расширение возможностей по оперативному и достоверному сбору больших массивов лесотаксационных показателей становится движущей силой в совершенствовании учетных технологий. Сокращение времени полевых исследований напрямую влияет на снижение финансовых издержек, позволяя, к примеру, многократное обследование одной и той же постоянной пробной площади выполнить в более короткие сроки, что в условиях интенсивного лесопользования является крайне важным обстоятельством.

Таким образом, современные мобильные приложения, использующие лидарную съемку, уже сейчас позволяют повысить эффективность и точность инвентаризации лесных экосистем. При дальнейшем развитии этой технологии и совершенствовании устройств можно ожидать еще более высоких показателей точности и производительности.

Замеры таксационных параметров деревьев по данной методике указаны в количестве, обеспечивающем достоверность различия между показателями на 95% доверительном уровне.

Данные методологические основы комплексных исследований структурной организации, естественной динамики и устойчивости лесных экосистем, а также восстановительных сукцессий после катастрофических нарушений в насаждениях апробирована автором на конференциях различного уровня и публикациях в ведущих научных журналах (Лежнев, 2023; Лежнев, Лебедев, 2023; Лежнев, Меняева, 2023б; Лежнев, Лебедев, 2024; Глазунов и др., 2024б; Лежнев, Купченко, 2024).

Список литературы

Абатуров, А.В. Меланхолин, П.Н. (2004) *Естественная динамика леса на постоянных пробных площадях в Подмоскowie*, Российская академия наук, Институт лесоведения, Тула, Гриф и К°, 333 с.

Беляева, Н.В., Григорьева, О.И., Гуталь, М.М. (2009) Обилие и константность как показатели участия вида в сложении растительной ассоциации, *Актуальные проблемы лесного комплекса*, № 22, с. 68-75.

Беляева, Н.А., Кузнецов, Е.Н., Григорьева, О.И. (2015) Изменение структуры живого напочвенного покрова под воздействием рекреационной нагрузки (на примере городского парка «Сосновка»), *Аграрный научный журнал*, с. 8-12.

Беляева, Н.В., Грязькин, А.В., Кази, И.А. (2012) Влияние выборочных рубок на развитие нижних ярусов растительности, *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, № 3 (86), с. 34-41.

Быков, А.В. (2008) *Стационарные исследования влияния рекреации на лесные биогеоценозы*, отв. редактор М.В. Рубцов, Институт лесоведения РАН, Тула, Гриф и К°, 358 с.

Васильев, О.Д. (2020) Картографирование средообразующих функций лесов и их сравнительный анализ в ландшафтах Московской области, *Вестник Московского университета. Серия География*, № 6, с. 21-31.

Глазунов, Ю.Б., Мельник, П.Г., Мерзленко, М.Д. (2016) Рост саратовского климатипа сосны обыкновенной в условиях Подмоскowie, *Аграрный научный журнал*, № 9, с. 9-14.

Глазунов, Ю.Б., Коротков, С.А., Лежнев, Д.В., Титовец, А.В. (2024а) Формирование сосняков сложных в Серебряноборском опытном лесничестве, *Лесоведение*, № 6, с. 595-603, doi: 10.31857/S0024114824060018.

Глазунов, Ю.Б., Полякова, Г.А., Коротков, С.А., Лежнев, Д.В., (2024б) Естественное возобновление на вырубках в Серебряноборском опытном лесничестве, *Сибирский лесной журнал*, № 2, с. 74-83, doi:10.15372/SJFS20240209.

Грязькин, А.В. (2001) *Возобновительный потенциал таежных лесов (на примере ельников Северо-Запада России): монография*, Санкт-Петербург, СПбГЛТА, 188 с.

Дубенок, Н.Н., Кузьмичев, В.В., Лебедев, А.В. (2020) *Результаты экспериментальных работ за 150 лет в Лесной опытной даче Тимирязевской сельскохозяйственной академии*, Москва, Наука, 382 с.

Дубенок, Н.Н., Лебедев, А.В., Чистяков, С.А., Гемонов, А.В. (2024) Естественное возобновление в насаждениях ядра заповедника «Кологривский лес», *Природообустройство*, № 3, с. 99-105, doi: 10.26897/1997-6011-2024-3-99-105.

Дубенок, Н.Н., Лебедев, А.В., Миронова, Г.М., Гостев, В.В. (2023) Таксономический анализ флоры сосудистых растений Лесной опытной дачи Тимирязевской академии, *Природообустройство*, № 1, с. 108-114.

Жмылев, П.Ю., Уланова, Н.Г., Чередниченко, О.В. (2021) *Биоразнообразие флористического состава фитоценозов. Подходы и методы*, М., МАКС Пресс, 112 с.

Загреев, В.В. и др. (1992) *Общесоюзные нормативы для таксации лесов*, Колос, Москва, 495 с.

Захаров, В.П. (2023) Как самые обычные люди помогают науке, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. 34, № 1-2, с. 143-151, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-143-151.

Захаров, В.П. (2025) Влияние *Amelanchier spicata* (Rosaceae) на естественное возобновление сосняков в условиях Орехово-Зуевского лесничества Московской области, *Российский журнал биологических инвазий*, т. 18, № 1, с. 60-69, doi: 10.35885/1996-1499-18-1-060-069.

Кабонен, А.В., Иванова, Н.В. (2023) Оценка биометрических характеристик деревьев по данным наземного lidar и разносезонной аэрофотосъемки в искусственных насаждениях, *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, т. 8(1), с. 64-83, doi: <https://doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.

Киселева, В.В. (2019) Динамика типов леса и типов насаждений национального парка «Лосиный остров», *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, т. 23, № 2, с. 20-28, doi:10.18698/2542-1468-2019-2-20-28.

Киселева, В.В., Коротков, С.А., Истомин, Н.А., Стоноженко, Л.В. (2012) К структуре ценопопуляций ели на пробных площадях в Национальном парке «Лосиный остров», *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник*, № 4, с. 23-31.

Коновалова, И.С., Коновалов, Д.Ю. (2023) Динамика живого напочвенного покрова на начальных этапах формирования лесных культур средней подзоны тайги, *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, № 2 (27), с. 27-37.

Коротков, С.А., Лежнев, Д.В., Фейзрахманов, А.Р. (2024) Индикационная роль живого напочвенного покрова сосновых лесов в урбанизированной среде, *Труды НОЦ – Ботанический сад МГУ, Материалы Всероссийской*

научно-практической конференции с международным участием, Москва, 12-13 февраля 2024 года, Москва, Издательство Московского университета, с. 150-158, doi: 10.55959/MSU012129-2-2024-8-150-158.

Коротков, С.А. (2023) *Смена состава древостоев и устойчивость защитных лесов центральной части Русской равнины*, Москва, Доблесть эпох, 168 с.

Коротков, С.А., Ухов, М.В. (2021) Оценка устойчивости лесных сообществ города Троицк (Новая Москва) в условиях возрастающей антропогенной нагрузки, *Вклад особо охраняемых природных территорий в экологическую устойчивость регионов: Современное состояние и перспективы: материалы II Всероссийской (с международным участием) конференции, приуроченной к 15-летию создания заповедника «Кологривский лес»*, Москва, с. 44-53.

Корчагин, А.А., Лавренко, Е.М. (1964) *Полевая геоботаника. Методическое руководство*, Изд-во Академии Наук СССР, т. 3, с. 531.

Корчагин, А.А. (1976) *Строение растительных сообществ. Полевая геоботаника*, Ленинград, Наука, т. 5, 313 с.

Криницын, И.Г. и др. (2024) Особенности структуры травянистого покрова и естественного возобновления в ельниках заповедника «Кологривский лес», *Тимирязевский биологический журнал*, № 1, с. 57-87.

Кузнецов, В.А., Рыжова, И.М., Телеснина, В.М., Стома, Г.В. (2015) Количественная оценка влияния рекреации на растительность, подстилку и плотность почв, *Вестник Московского университета*, № 1, с. 21-29.

Лебедев, А.В. (2023) Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона, *Лесотехнический журнал*, т. 13, № 3(51), с. 56-70, doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5.

Лежнев, Д.В. (2022) Возобновление под пологом сосняков и на вырубках в ближайшем Подмосковье, *Повышение эффективности лесного комплекса, Материалы Восьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием (Петрозаводск, 24 мая 2022 г.)*, Петрозаводск, Петрозаводский государственный университет, с. 95-97.

Лежнев, Д.В. (2023) Строение сосновых фитоценозов в Московском регионе под влиянием климатических трансформаций, *Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг*, № 9, с. 63-73, doi: 10.25686/foreco.2023.10.66.007.

Лежнев, Д.В., Меняева, В.А. (2023а) Живой напочвенный покров сосновых фитоценозов Яузского лесопарка "Лосинового острова", *Проблемы озеленения крупных городов, Сборник статей XXII Научно-практического форума, Москва, 29-30 августа 2023 года*, Москва, ООО "МК-ИНТЕРТРЕЙД", ООО "ИНТЕК", с. 113-118.

Лежнев, Д.В., Меняева, В.А. (2023б) Видовой состав и структура живого напочвенного покрова в сосновых фитоценозах национального парка "Лосиный остров", *Безопасность природопользования в условиях устойчивого раз-*

виятия, *Материалы III Международной научно-практической конференции, приуроченной к 75-летию географического факультета, Иркутск, 21-23 июня 2023 года*, Иркутск, Иркутский государственный университет, с. 156-161.

Лежнев, Д.В. Меняева В.А. (2024) Эколого-фитоценотический анализ травяно-кустарничкового яруса в сосновых лесах национального парка «Лосинный остров», *Природоподобные растительные сообщества в городе: от теории к практике, Сборник статей Научно-практического симпозиума, Москва, 29 августа 2024 г.*, Москва, ООО "Эксперт-Печать", с. 52-56.

Лежнев, Д.В., Куликова, Д.Д., Полякова, Г.А. (2023) Восстановительная динамика сосновых фитоценозов на вырубках в надпойменных террасах реки Москвы, *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*, т. 31, № 4, с. 447-467, doi: 10.22363/2313-2310-2023-31-4-447-467.

Лежнев, Д.В., Лебедев А.В. (2023) Динамика и устойчивость сосновых древостоев в урбоэкосистемах Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, № 245, с. 93-111, doi: 10.21266/2079-4304.2023.245.93-111.

Лежнев, Д.В., Лебедев, А.В. (2024) Онтогенетическая структура ценопопуляций древесных растений в спелых сосновых насаждениях Москвы, *Поволжский экологический журнал*, № 4, с. 471-486, doi: 10.35885/1684-7318-2024-4-471-486.

Лежнев, Д.В., Коротков, С.А. (2024) Естественное возобновление под пологом сосновых фитоценозов в Московском регионе, *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, № 248, с. 6-26, doi: 10.21266/2079-4304.2024.248.6-26.

Лежнев, Д.В., Купченко, К.М. (2024) Восстановительная динамика сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) после ветровала на вырубках в Ближнем Подмоскowie, *Актуальные проблемы развития лесного комплекса, Материалы XXII Международной научно-технической конференции, Вологда, 05 декабря 2024 г.*, Вологда, Вологодский государственный университет, с. 316-321.

Маевский, П.Ф. (2014) *Флора средней полосы европейской части России*, 11-е изд., Москва, Товарищество научных изданий КМК, 635 с.

Майоров, С.Р. и др. (2012) *Адвентивная флора Москвы и Московской области*, 412 с.

Орлов, М.М. (1931) *Лесная вспомогательная книжка*, Москва, Гостехиздат, 729 с.

Пилипко, Е.Н. (2013) *Методология исследований лесных экосистем: методическое пособие*, сост. Е. Н. Пилипко, Вологда, Молочное, ИЦ ВГМХА, 100 с.

Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 09.11.2020 № 910 "Об утверждении Порядка проведения лесопатологических обследований и формы акта лесопатологического обследования" (2020) 31с.

Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 05.08.2022 № 510 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции» (2022) URL: <https://docs.cntd.ru/document/351878696> (дата обращения 05.04.2025).

Работнов, Т.А. (1992) *Фитоценология: учебное пособие для вузов по направлению «Биология» и специальности «Ботаника»*, 3-е изд., Москва, Издательство МГУ, 349 с.

Роувинен, Т. (2014) Трестима – цифровые фотографии для таксации леса, *Сибирский лесной журнал*, № 5, с. 69-76, URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22740162>.

Румянцев, Д.Е., Липаткин, В.А., Загреева, А.Б. (2023) *Основы геоботаники*, Москва, Профессиональная наука, 68 с., ISBN 978-5-907607-50-7.

Список сосудистых растений с указанием их принадлежности к эколого-ценотическим группам (2006) Электронный ресурс, URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/ecogroup.html> (дата обращения: 22.04.2025).

Сукачев, В.Н., Зонн, С.В. (1961) *Методические указания к изучению типов леса*, Москва, Издательство академии наук СССР, 143 с.

Теоретические вопросы фитоиндикации: сборник статей (1971) Отв. ред. А.А. Корчагин, Академия наук СССР, Всесоюзное ботаническое общество, Ленинград, Наука, Ленинградское отделение, 214 с.

Терехина, Н.В. (2022) *Полевая учебная практика по биогеографии: учебно-методическое пособие*, Санкт-Петербург, СПбГУ, 106 с., ISBN 978-5-28806283-4.

Тихонова, М.В., Спыну, М.Т., Александров, Н.А. и др. (2023) Описание фитоценозов с оценкой биомассы на различных сукцессионных стадиях развития лесной экосистемы Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника, *АгроЭкоИнфо*, № 6(60), doi: 10.51419/202136627.

Уфимцев, В.И., Стрельникова, Т.О., Куприянов, О.А. (2018) Структура живого напочвенного покрова в сосняках на участках рекультивации Кузбасса, *Вестник Томского ГУ. Биология*, № 44, с. 36-58.

Хромова, Т.М. (2022) *Учебная полевая практика по ботанике: учебное пособие для вузов*, 2-е изд., Санкт-Петербург, Лань, 164 с., ISBN 978-5-507-44800-5.

Черненкова, Т.В. и др. (2019) Характеристика и перспективы сохранения сосновых лесов Московской области, *Лесоведение*, № 5, с. 449-464.

Чижов, Б.Е. (2003) *Регулирование травяного покрова при лесовосстановлении*, М., ВНИИЛМ, 174 с.

Bertrand, R. et al. (2011) Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests, *Nature*, vol. 479, no. 7374, pp. 517-520.

Carle, J., Holmgren, J. (2017) LiDAR in Forest Inventory and Biometric Analysis, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 58, pp. 16-28.

Chamberlain, S.A. et al. (2022) Assessing plant biodiversity and distribution using citizen science data: A case study with iNaturalist, *Ecology and Evolution*, vol. 12(3), e9300, doi: 10.1002/ece3.9300.

Elliott, K. et al. (2015) Functional role of the herbaceous layer in eastern deciduous forest ecosystems, *Ecosystems*, no. 18, pp. 221-236.

George, L.O., Bazzaz, F.A. (2014) The herbaceous layer as a filter determining spatial pattern in forest tree regeneration, *The herbaceous layer in forests of eastern North America*, in F.S. Gillam (ed.), New York, Oxford University Press, pp. 340-355.

Gilliam, F.S. (2007) The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems, *BioScience*, vol. 57, no. 10, pp. 845-858.

Gollob, C., Ritter, T., Wassermann, C., Nothdurft, A. (2019) Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots, *Remote Sens.*, vol. 11, p. 1602, doi: <https://doi.org/10.3390/rs11131602>.

Honkavaara, E., Hakala, T., Viljanen, N. et al. (2016) Geospatial Solutions in Forest Inventory Using Low-Altitude Drone Imagery and LiDAR, *Remote Sensing*, vol. 8(10), pp. 1-17.

Korotkov, S., Stonozenko, L., Lezhnev, D., Ereghina S. (2023) Pine Plants Formation in the North-Eastern Moscow Region, *II International Conference "Sustainable Development: Agriculture, Veterinary Medicine and Ecology" (VMAEE-II-2023)*, vol. 3011, Karshi, New York, AIP PUBLISHING, p. 20031, doi: 10.1063/5.0161107.

La Sorte, F.A. et al. (2022) Global patterns of plant observations on iNaturalist reveal insights into citizen science contributions to geobotanical research, *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 20, pp. 123-130, doi: 10.1002/fee.2500.

Lezhnev, D. et al. (2025) Vertical and horizontal structure of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the central part of the Russian Plain, *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*, vol. 623, p. 01023.

Lezhnev, D., Korotkov, S., Stonozenko, L., Popova, A. (2024) The Growing Dynamic of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stands in the Moscow Region, *III International Conference Sustainable Development: Agriculture, Energy and Ecology (VMAEE-III-2024)*, *AIP Conference Proceedings*, Karshi, Melville, AIP PUBLISHING, p. 20045, doi: 10.1063/5.0211896.

Liang, X., Hyypä, J., Kaartinen, H. et al. (2016) The Use of a Mobile Phone-Based LiDAR for Individual Tree Detection in Forest Inventory, *Forestry*, vol. 89(2), pp. 79-87.

Muller, R.N. (2014) Nutrient relations of the herbaceous layer in deciduous forest ecosystems, *The herbaceous layer in forests of eastern North America*, in F.S. Gilliam (ed.), New York, NY, Oxford University Press, pp. 13-34.

Pace, R., Masini, E., Giuliarelli, D., Biagiola, L., Tomao, A., Guidolotti, G., Agrimi, M., Portoghesi, L., De Angelis, P., Calfapietra, C. (2022) Tree Measurements in the Urban Environment: Insights from Traditional and Digital Field Instruments to Smartphone Applications, *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, vol. 48(2), pp. 113-123, doi: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>.

Peebles-Spencer, J.R., Gorchov, D.L., Crist, T.O. (2017) Effects of an invasive shrub, *Lonicera maackii*, and a generalist herbivore, white-tailed deer, on forest floor plant community composition, *Forest Ecology and Management*, vol. 402, pp. 204-212.

Proudman, A., Ramezani, M., Digumarti, S.T., Chebrolu, N., Fallon, M. (2022) Towards real-time forest inventory using handheld LiDAR, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 157, p. 104240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104240>.

Sandim, A., Amaro, M., Silva, M.E., Cunha, J., Morais, S., Marques, A., Ferreira, A., Lousada, J.L., Fonseca, T. (2023) New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications, *Forests*, vol. 14, p. 1553, doi: <https://doi.org/10.3390/f14081553>.

Seregin, A.P., Seregin, A.P., Bochkov, D.A., Shner, J.V. et al. (2020) "Flora of Russia" on iNaturalist: A dataset, *Biodiversity Data Journal*, vol. 8, p. 59249, doi: [10.3897/BDJ.8.e59249](https://doi.org/10.3897/BDJ.8.e59249).

Thrippleton, T. et al. (2018) Overstorey – understorey interactions intensify after drought-induced forest die-off: Long-term effects for forest structure and composition, *Ecosystems*, vol. 21, no. 4, pp. 723-739.

Woo, H., Kim, I., Choi, B. (2021) Computer Vision Techniques in Forest Inventory Assessment: Improving Accuracy of Tree Diameter Measurement Using Smartphone Camera and Photogrammetry, *Sensors and Materials*, vol. 33(11), pp. 3835-3845, doi: <https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3605>.

References

Abaturov, A.V. Melankholin, P.N. (2004) *Yestestvennaya dinamika lesa na postoyannykh probnykh ploshchadyakh v Podmoskov'ye* [Natural Forest dynamics on permanent sample plots in the Moscow region], Grif i K°, Russian Academy of Sciences, Institute of Forest Science, Tula, Russia, 333 p.

Belyaeva, N.V., Grigorieva, O.I., Gutal, M.M. (2009) Obiliye i konstantnost' kak pokazateli uchastiya vida v slozhenii rastitel'noy assotsiatsii [Abundance and constancy as indicators of species participation in the formation of a plant association], *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], no. 22, pp. 68-75.

Belyaeva, N.A., Kuznetsov, E.N., Grigorieva, O.I. (2015) *Izmeneniye struktury zhivogo napochvennogo pokrova pod vozdeystviyem rekreatsionnoy nagruzki (na primere gorodskogo parka «Sosnovka»)* [Changes in the structure of the living ground cover under the influence of recreational load (on the example of the city park "Sosnovka")], *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*, pp. 8-12.

Belyaeva, N.V., Gryazkin, A.V., Kazi, I.A. (2012) *Vliyaniye vyborochnykh rubok na razvitiye nizhnikh yarusov rastitel'nosti* [The Impact of Selective Felling on the Development of Lower Vegetation Layers], *Forestry Bulletin*, no. 3 (86), pp. 34-41.

Bykov, A.V. (2008) *Statsionarnyye issledovaniya vliyaniya rekreatsii na lesnyye biogeotsenozy* [Stationary Studies of the Impact of Recreation on Forest Biogeocenoses], in M.V. Rubtsov (ed.), *Grif i K°*, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Tula, Russia, 358 p.

Vasiliev, O.D. (2020) *Kartografirovaniye sredobrazuyushchikh funktsiy lesov i ikh sravnitel'nyy analiz v landshaftakh Moskovskoy oblasti* [Mapping of forest habitat-forming functions and their comparative analysis in the landscapes of the Moscow region], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya Geografiya*, no. 6, pp. 21-31.

Glazunov, Yu.B., Melnik, P.G., Merzlenko, M.D. (2016) *Rost saratovskogo klimatipa sosny obyknovennoy v usloviyakh Podmoskov'ya* [Growth of the Saratov climatype of Scots pine in the Moscow region], *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*, no. 9, pp. 9-14.

Glazunov, Yu.B., Korotkov, S.A., Lezhnev, D.V., Titovets, A.V. (2024a) *Formirovaniye sosnyakov slozhnykh v Serebryanoborskom opytnom lesnichestve* [Formation of complex pine forests in the Serebryanobor experimental forestry], *Lesovedeniye*, no. 6, pp. 595-603, doi: 10.31857/S0024114824060018.

Glazunov, Yu.B., Polyakova, G.A., Korotkov, S.A., Lezhnev, D.V., (2024b) *Yestestvennoye vozobnovleniye na vyrubkakh v Serebryanoborskom opytnom lesnichestve* [Natural regeneration in clear-cut areas of the Serebryanobor experimental forestry], *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, no. 2, pp. 74-83, doi:10.15372/SJFS20240209.

Gryazkin, A.V. (2001) *Vozobnovitel'nyy potentsial tayezhnykh lesov (na primere yel'nikov Severo-Zapada Rossii): monografiya* [Renewable potential of taiga forests (using spruce forests of Northwest Russia as an example): monograph], SPbGLTA, St. Petersburg, Russia, 188 p.

Dubenok, N.N., Kuzmichev, V.V., Lebedev, A.V. (2020) *Rezul'taty eksperimental'nykh rabot za 150 let v Lesnoy opytnoy dache Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Results of experimental work over 150 years at the Forest Experimental Dach of the Timiryazev Agricultural Academy], Nauka, Moscow, Russia, 382 p.

Dubenok, N.N., Lebedev, A.V., Chistyakov, S.A., Gemonov, A.V. (2024) *Yestestvennoye vozobnovleniye v nasazhdeniyakh yadra zapovednika «Kologrivskiy les»* [Natural regeneration in the core plantings of the Kologrivsky Forest Nature Reserve], *Prirodoobustroystvo*, no. 3, pp. 99-105, doi: 10.26897/1997-6011-2024-3-99-105.

Dubenok, N.N., Lebedev, A.V., Mironova, G.M., Gostev, V.V. (2023) Taksonomicheskiy analiz flory sosudistyykh rasteniy Lesnoy opytной dachi Timiryazevskoy akademii [Taxonomic analysis of the vascular plant flora of the Timiryazev Academy's Forest Experimental Dacha], *Prirodoobstroystvo*, no. 1, pp. 108-114.

Zhmylev, P.Yu., Ulanova, N.G., Cherednichenko, O.V. (2021) *Bioraznoobraznye floristicheskogo sostava fitotsenozov. Podkhody i metody* [Biodiversity of the floristic composition of phytocenoses. Approaches and methods], MAKS Press, Moscow, Russia, 112 p.

Zagreev, V.V. et al. (1992) *Obshchesoyuznyye normativy dlya taksatsii lesov* [All-Union standards for forest taxation], Kolos, Moscow, Russia, 495 p.

Zakharov, V.P. (2023) Kak samyye obychnyye lyudi pomagayut nauke [How ordinary people help science], *Ekologicheskii monitoring i modelirovaniye ekosistem*, vol. 34, no. 1-2, pp. 143-151, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-143-151.

Zakharov, V.P. (2025) Vliyaniye Amelanchier spicata (Rosaceae) na yestestvennoye vozobnovleniye sosnyakov v usloviyakh Orekhovo-Zuyevskogo lesnichestva Moskovskoy oblasti [The influence of Amelanchier spicata (Rosaceae) on the natural regeneration of pine forests in the Orekhovo-Zuevsky forestry, Moscow region], *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy*, vol. 18, no. 1, pp. 60-69, doi: 10.35885/1996-1499-18-1-060-069.

Kabonen, A.V., Ivanova, N.V. (2023) Otsenka biometricheskikh kharakteristik derev'yev po dannym nazemnogo lidar i raznosezonnoy aerofotos"yemki v iskusstvennykh nasazhdeniyakh [Assessment of tree biometric characteristics using ground-based lidar and multi-season aerial photography in artificial plantations], *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*, vol. 8(1), pp. 64-83, doi: <https://doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.

Kiseleva, V.V. (2019) Dinamika tipov lesa i tipov nasazhdeniy natsional'nogo parka «Losinyy ostrov» [Dynamics of forest types and plantation types in Losiny Ostrov National Park], *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*, vol. 23, no. 2, pp. 20-28, doi:10.18698/2542-1468-2019-2-20-28.

Kiseleva, V.V., Korotkov, S.A., Istomin, N.A., Stonozhenko, L.V. (2012) K strukture tsenopopulyatsiy yeli na probnykh ploshchadyakh v Natsional'nom parke «Losinyy ostrov» [On the structure of spruce cenopopulations on test plots in the Losiny Ostrov National Park], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoy vestnik* [Bulletin of the Moscow State University of Forestry. Lesnoy Vestnik], no. 4, pp. 23-31.

Konovalova, I.S., Konovalov, D.Yu. (2023) Dinamika zhivogo napochvennogo pokrova na nachal'nykh etapakh formirovaniya lesnykh kul'tur sredney podzony taygi [Dynamics of living ground cover at the initial stages of forest culture formation in the middle taiga subzone], *Lesnoy vestnik*, no. 2 (27), pp. 27-37.

Korotkov, S.A., Lezhnev, D.V., Feyzrakhmanov, A.R. (2024) Indikatsionnaya rol' zhivogo napochvennogo pokrova osnovnykh lesov v urbanizirovannoy srede

[The indicative role of the living ground cover of pine forests in an urbanized environment], *Trudy NOTS – Botanicheskij sad MGU, Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, Moskva, 12-13 fevralya 2024 goda* [Proceedings of the Scientific and Educational Center – Botanical Garden of Moscow State University Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, Moscow, February 12-13, 2024], Moscow University Press, Moscow, Russia, pp. 150-158, doi: 10.55959/MSU012129-2-2024-8-150-158.

Korotkov, S.A. (2023) *Smena sostava drevostoyev i ustoychivost' zashchitnykh lesov tsentral'noy chasti Russkoy ravniny* [Change in the composition of tree stands and the stability of protective forests in the central part of the Russian Plain], *Doblest' epok*, Moscow, Russia, 168 p.

Korotkov, S.A., Ukhov, M.V. (2021) *Otsenka ustoychivosti lesnykh soobshchestv goroda Troitsk (Novaya Moskva) v usloviyakh vozrastayushchey antropogennoy nagruzki* [Assessment of the sustainability of forest communities in the city of Troitsk (New Moscow) under increasing anthropogenic pressure], *Vklad osobo okhranyayemykh prirodnikh territoriy v ekologicheskuyu ustoychivost' regionov: Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy: materialy II Vserossiyskoy (s mezhdunarodnym uchastiyem) konferentsii, priurochennoy k 15-letiyu sozdaniya zapovednika «Kologrivskiy les»* [Contribution of specially protected natural areas to the environmental sustainability of regions: Current state and prospects: Proceedings of the II All-Russian (with international participation) conference dedicated to the 15th anniversary of the establishment of the Kologrivsky Forest Nature Reserve], Moscow, Russia, pp. 44-53.

Korchagin, A.A., Lavrenko, E.M. (1964) *Polevaya geobotanika. Metodicheskoye rukovodstvo* [Field Geobotany. Methodological Guide], Publishing House of the USSR Academy of Sciences, vol. 3, p. 531.

Korchagin, A.A. (1976) *Stroyeniye rastitel'nykh soobshchestv. Polevaya geobotanika* [Structure of Plant Communities. Field Geobotany], Nauka, Leningrad, Russia, vol. 5, 313 p.

Krinit syn, I.G. et al. (2024) *Osobennosti struktury travyanistogo pokrova i yestestvennogo vozobnovleniya v yel'nikakh zapovednika «Kologrivskiy les»* [Features of the Structure of the Herbaceous Cover and Natural Regeneration in Spruce Forests of the Kologrivsky Forest Nature Reserve], *Timiryazevskiy biologicheskij zhurnal*, no. 1, pp. 57-87.

Kuznetsov, V.A., Ryzhova, I.M., Telesnina, V.M., Stoma, G.V. (2015) *Kolichestvennaya otsenka vliyaniya rekreatsii na rastitel'nost', podstilku i plotnost' pochv* [Quantitative assessment of the impact of recreation on vegetation, litter and soil density], *Vestnik Moskovskogo universiteta*, no. 1, pp. 21-29.

Lebedev, A.V. (2023) *Inventarizatsiya drevesnykh nasazhdeniy urbanizirovannykh territoriy s ispol'zovaniyem smartfona*, [Inventory of tree stands

in urbanized areas using a smartphone], *Lesotekhnicheskij zhurnal*, vol. 13, no. 3(51), pp. 56-70, doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5.

Lezhnev, D.V. (2022) Vozobnovleniye pod pologom sosnyakov i na vyrubkakh v blizhayshe Podmoskov'ye, Povysheniye effektivnosti lesnogo kompleksa [Regeneration under the canopy of pine forests and in clearings in the near Moscow region, Improving the efficiency of the forest complex], *Materialy Vos'moy Vserossiyskoy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem (Petrozavodsk, 24 maya 2022 g.)* [Proceedings of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation (Petrozavodsk, May 24, 2022)], Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia, Russia, pp. 95-97.

Lezhnev, D.V. (2023) Stroyeniye sosnovykh fitotsenozov v Moskovskom regione pod vliyaniem klimaticheskikh transformatsiy [The structure of pine phytocenoses in the Moscow region under the influence of climatic transformations], *Lesnyye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyy monitoring* [Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring], no. 9, pp. 63-73, doi: 10.25686/foreco.2023.10.66.007.

Lezhnev, D.V., Menyaeva, V.A. (2023a) Zhivoy napochvennyy pokrov sosnovykh fitotsenozov Yauzskogo lesoparka "Losinogo ostrova" [Living ground cover of pine phytocenoses of the Yauza forest park "Losiny Ostrov"], *Problemy ozeleneniya krupnykh gorodov, Sbornik statey XXII Nauchno-prakticheskogo foruma, Moskva, 29-30 avgusta 2023 goda* [Problems of greening of large cities, Collection of articles of the XXII Scientific and Practical Forum, Moscow, August 29-30, 2023], ООО "МК-INTERTRADE", ООО "ИНТЕК", Moscow, Russia, pp. 113-118.

Lezhnev, D.V., Menyaeva, V.A. (2023b) Vidovoy sostav i struktura zhivogo napochvennogo pokrova v sosnovykh fitotsenozakh natsional'nogo parka "Losiny ostrov", Bezopasnost' prirodopol'zovaniya v usloviyakh ustoychivogo razvitiya [Species composition and structure of the living ground cover in pine phytocenoses of the Losiny Ostrov National Park], *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 75-letiyu geograficheskogo fakul'teta, Irkutsk, 21-23 iyunya 2023 goda* [Safety of Nature Management in the Context of Sustainable Development, Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference dedicated to the 75th Anniversary of the Faculty of Geography, Irkutsk, June 21-23, 2023], Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, pp. 156-161.

Lezhnev, D.V. Menyaeva V.A. (2024) Ekologo-fitotsenoticheskiy analiz travyano-kustarnichkovogo yarusy v sosnovykh lesakh natsional'nogo parka «Losinyy ostrov» [Ecological and phytocenotic analysis of the grass-dwarf shrub layer in the pine forests of the Losiny Ostrov National Park], *Prirodopodobnyye rastitel'nyye soobshchestva v gorode: ot teorii k praktike, Sbornik statey Nauchno-prakticheskogo simpoziuma, Moskva, 29 avgusta 2024 g.* [Nature-like plant communities in the city: from theory to practice, Collection of articles of the

Scientific and Practical Symposium, Moscow, August 29, 2024], Expert-Pechat LLC, Moscow, Russia, pp. 52-56.

Lezhnev, D.V., Kulikova, D.D., Polyakova, G.A. (2023) Vosstanovitel'naya dinamika osnovnykh fitotsenozov na vyrubkakh v nadpoymennykh terrasakh reki Moskvy [Restoration dynamics of pine phytocenoses in clearings on floodplain terraces of the Moskva River], *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, vol. 31, no. 4, pp. 447-467, doi: 10.22363/2313-2310-2023-31-4-447-467.

Lezhnev, D.V., Lebedev A.V. (2023) Dinamika i ustoychivost' osnovnykh drevostoyev v urboekosistemakh Lesnoy opytной dachi RGAU-MSKHA imeni K.A. Timiryazeva [Dynamics and stability of pine stands in the urban ecosystems of the Forest Experimental Dacha of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev], *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Izvestiya of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], no. 245, pp. 93-111, doi: 10.21266/2079-4304.2023.245.93-111.

Lezhnev, D.V., Lebedev, A.V. (2024) Ontogeneticheskaya struktura tsenopopulyatsiy drevesnykh rasteniy v spelykh osnovnykh nasazhdeniyakh Moskvy [Ontogenetic structure of woody plant cenopopulations in mature pine stands of Moscow], *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal*, no. 4, pp. 471-486, doi: 10.35885/1684-7318-2024-4-471-486.

Lezhnev, D.V., Korotkov, S.A. (2024) Yestestvennoye vozobnovleniye pod pogom osnovnykh fitotsenozov v Moskovskom regione [Natural regeneration under the canopy of pine phytocenoses in the Moscow region], *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Izvestiya of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], no. 248, pp. 6-26, doi: 10.21266/2079-4304.2024.248.6-26.

Lezhnev, D.V., Kupchenko, K.M. (2024) osstanovitel'naya dinamika sosny obyknovnoy (*Pinus sylvestris* L.) posle vetrovala na vyrubkakh v Blizhnem Podmoskov'ye [Recovery dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) after windfall in clearings in the near Moscow region], *Aktual'nyye problemy razvitiya lesnogo kompleksa, Materialy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Vologda, 05 dekabrya 2024 g.* [Actual problems of forest complex development, Proceedings of the XXII International Scientific and Technical Conference, Vologda, December 5, 2024], Vologda State University, Vologda, Russia, pp. 316-321.

Mayevsky, P.F. (2014) *Flora sredney polosy yevropeyskoy chasti Rossii* [Flora of the Central Belt of the European Part of Russia], KMK Scientific Publications Association, Moscow, Russia, 635 p.

Mayorov, S.R. et al. (2012) *Adventivnaya flora Moskvy i Moskovskoy oblasti* [Adventitious Flora of Moscow and the Moscow Region], Russia, 412 p.

Orlov, M.M. (1931) *Lesnaya vspomogatel'naya knizhka* [Forest Auxiliary Book], Gostekhizdat, Moscow, Russia, 729 p.

Pilipko, E.N. (2013) *Metodologiya issledovaniy lesnykh ekosistem: metodicheskoye posobiye* [Methodology of Forest Ecosystem Studies: A Methodological Handbook], compiled by E.N. Pilipko, Molochnoye, IC VGMHA, Vologda, Russia, 100 p.

Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 09.11.2020 № 910 "Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya lesopatologicheskikh obsledovaniy i formy akta lesopatologicheskogo obsledovaniya" [Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated November 9, 2020 No. 910 "On Approval of the Procedure for Conducting Forest Pathology Surveys and the Form of the Forest Pathology Survey Report"] (2020) 31p.

Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 05.08.2022 № 510 «Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noy instruktsii» [Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated August 5, 2022 No. 510 "On Approval of the Forest Management Instructions"] (2022) URL: <https://docs.cntd.ru/document/351878696> (accessed April 5, 2025).

Rabotnov, T.A. (1992) *Fitotsenologiya: uchebnoye posobiye dlya vuzov po napravleniyu «Biologiya» i spetsial'nosti «Botanika»* [Phytocenology: A Textbook for Universities Majoring in Biology and Specializing in Botany], Moscow State University Publishing House, Moscow, Russia, 349 p.

Rouvinen, T. (2014) Trestima – tsifrovyye fotografii dlya taksatsii lesa [Trestima – digital photographs for forest taxation], *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, no. 5, pp. 69-76, URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22740162>.

Rumyantsev, D.E., Lipatkin, V.A., Zagreeva, A.B. (2023) *Osnovy geobotanik* [Fundamentals of Geobotany], Professional Science, Moscow, Russia, 68 pp., ISBN 978-5-907607-50-7.

Spisok sosudistyykh rasteniy s ukazaniyem ikh prinadlezhnosti k ekologo-tsenoticheskim gruppam [List of vascular plants with an indication of their affiliation with ecocoenotic groups] (2006) URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/ecogroup.html> (date of access: 22.04.2025).

Sukachev, V.N., Zonn, S.V. (1961) *Metodicheskiye ukazaniya k izucheniyu tipov lesa* [Methodological Guidelines for the Study of Forest Types], Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, Russia, 143 p.

Teoreticheskiye voprosy fitoindikatsii: sbornik statey [Theoretical Issues of Phytoindication: A Collection of Articles] (1971) In A.A. Korchagin (Ed.), USSR Academy of Sciences, All-Union Botanical Society, Leningrad, Nauka, Leningrad Branch, Russia, 214 p.

Terekhova, N.V. (2022) *Polevaya uchebnaya praktika po biogeografii: uchebno-metodicheskoye posobiye* [Field Training in Biogeography: A Textbook-Methodological Manual], St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, 106 p., ISBN 978-5-28806283-4.

Tikhonova, M.V., Spynu, M.T., Aleksandrov, N.A. et al. (2023) Opisaniye fitotsenozov s otsenkoy biomassy na razlichnykh suktsessionnykh stadiyakh razvitiya lesnoy ekosistemy Tsentral'no-Lesnogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika [Description of phytocenoses with biomass assessment at various successional stages of forest ecosystem development in the Central Forest State Nature Biosphere Reserve], *AgroEcoInfo*, no. 6(60), doi: 10.51419/202136627.

Ufimtsev, V.I., Strelnikova, T.O., Kupriyanov, O.A. (2018) Struktura zhivogo napochvennogo pokrova v sosnyakakh na uchastkakh rekul'tivatsii Kuzbassa [Structure of living ground cover in pine forests on reclamation sites in Kuzbass], *Vestnik Tomskogo GU. Biologiya*, no. 44, pp. 36-58.

Khromova, T.M. (2022) *Uchebnaya polevaya praktika po botanike: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Educational Field Practice in Botany: A Textbook for Universities], Lan, St. Petersburg, Russia, 164 p., ISBN 978-5-507-44800-5.

Chernenkova, T.V. et al. (2019) Kharakteristika i perspektivy sokhraneniya sosnovykh lesov Moskovskoy oblasti [Characteristics and Prospects for Conserving Pine Forests in the Moscow Region], *Lesovedeniye*, no. 5, pp. 449-464.

Chizhov, B.E. (2003) *Regulirovaniye travyanogo pokrova pri lesovosstanovlenii* [Regulation of Grass Cover during Reforestation], VNIILM, Moscow, Russia, 174 p.

Bertrand, R. et al. (2011) Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests, *Nature*, vol. 479, no. 7374, pp. 517-520.

Carle, J., Holmgren, J. (2017) LiDAR in Forest Inventory and Biometric Analysis, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 58, pp. 16-28.

Chamberlain, S.A. et al. (2022) Assessing plant biodiversity and distribution using citizen science data: A case study with iNaturalist, *Ecology and Evolution*, vol. 12(3), e9300, doi: 10.1002/ece3.9300.

Elliott, K. et al. (2015) Functional role of the herbaceous layer in eastern deciduous forest ecosystems, *Ecosystems*, no. 18, pp. 221-236.

George, L.O., Bazzaz, F.A. (2014) The herbaceous layer as a filter determining spatial pattern in forest tree regeneration, *The herbaceous layer in forests of eastern North America*, in F.S. Gillam (ed.), New York, Oxford University Press, pp. 340-355.

Gilliam, F.S. (2007) The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems, *BioScience*, vol. 57, no. 10, pp. 845-858.

Gollob, C., Ritter, T., Wassermann, C., Nothdurft, A. (2019) Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots, *Remote Sens.*, vol. 11, p. 1602, doi: <https://doi.org/10.3390/rs11131602>.

Honkavaara, E., Hakala, T., Viljanen, N. et al. (2016) Geospatial Solutions in Forest Inventory Using Low-Altitude Drone Imagery and LiDAR, *Remote Sensing*, vol. 8(10), pp. 1-17.

Korotkov, S., Stonozenko, L., Lezhnev, D., Ereghina S. (2023) Pine Plants Formation in the North-Eastern Moscow Region, *II International Conference "Sustainable Development: Agriculture, Veterinary Medicine and Ecology" (VMAEE-II-2023)*, vol. 3011, Karshi, New York, AIP PUBLISHING, p. 20031, doi: 10.1063/5.0161107.

La Sorte, F.A. et al. (2022) Global patterns of plant observations on iNaturalist reveal insights into citizen science contributions to geobotanical research, *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 20, pp. 123-130, doi: 10.1002/fee.2500.

Lezhnev, D. et al. (2025) Vertical and horizontal structure of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the central part of the Russian Plain, *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*, vol. 623, p. 01023.

Lezhnev, D., Korotkov, S., Stonozenko, L., Popova, A. (2024) The Growing Dynamic of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stands in the Moscow Region, *III International Conference Sustainable Development: Agriculture, Energy and Ecology (VMAEE-III-2024)*, *AIP Conference Proceedings*, Karshi, Melville, AIP PUBLISHING, p. 20045, doi: 10.1063/5.0211896.

Liang, X., Hyypä, J., Kaartinen, H. et al. (2016) The Use of a Mobile Phone-Based LiDAR for Individual Tree Detection in Forest Inventory, *Forestry*, vol. 89(2), pp. 79-87.

Muller, R.N. (2014) Nutrient relations of the herbaceous layer in deciduous forest ecosystems, *The herbaceous layer in forests of eastern North America*, in F.S. Gilliam (ed.), New York, NY, Oxford University Press, pp. 13-34.

Pace, R., Masini, E., Giulianielli, D., Biagiola, L., Tomao, A., Guidolotti, G., Agrimi, M., Portoghesi, L., De Angelis, P., Calfapietra, C. (2022) Tree Measurements in the Urban Environment: Insights from Traditional and Digital Field Instruments to Smartphone Applications, *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, vol. 48(2), pp. 113-123, doi: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>.

Peebles-Spencer, J.R., Gorchov, D.L., Crist, T.O. (2017) Effects of an invasive shrub, *Lonicera maackii*, and a generalist herbivore, white-tailed deer, on forest floor plant community composition, *Forest Ecology and Management*, vol. 402, pp. 204-212.

Proudman, A., Ramezani, M., Digumarti, S.T., Chebrolu, N., Fallon, M. (2022) Towards real-time forest inventory using handheld LiDAR, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 157, p. 104240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104240>.

Sandim, A., Amaro, M., Silva, M.E., Cunha, J., Morais, S., Marques, A., Ferreira, A., Lousada, J.L., Fonseca, T. (2023) New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications, *Forests*, vol. 14, p. 1553, doi: <https://doi.org/10.3390/f14081553>.

Seregin, A.P., Seregin, A.P., Bochkov, D.A., Shner, J.V. et al. (2020) "Flora of Russia" on iNaturalist: A dataset, *Biodiversity Data Journal*, vol. 8, p. 59249, doi: 10.3897/BDJ.8.e59249.

Thrippleton, T. et al. (2018) Overstorey – understorey interactions intensify after drought-induced forest die-off: Long-term effects for forest structure and composition, *Ecosystems*, vol. 21, no. 4, pp. 723-739.

Woo, H., Kim, I., Choi, B. (2021) Computer Vision Techniques in Forest Inventory Assessment: Improving Accuracy of Tree Diameter Measurement Using Smartphone Camera and Photogrammetry, *Sensors and Materials*, vol. 33(11), pp. 3835-3845, doi: <https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3605>.

Статья поступила в редакцию (Received): 25.05.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 16.07.2025.

Для цитирования / For citation:

Лежнев, Д.В. (2025) Методологические основы комплексных исследований лесных фитоценозов, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVI, № 3-4, с. 19-56, doi: 10.21513/0207-2564-2025-3-4-19-56.

Lezhnev, D.V. (2025) Methodological foundations of complex studies of forest phytocenoses, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVI, no. 3-4, pp. 19-56, doi: 10.21513/0207-2564-2025-3-4-19-56.

Радиоэкологические угрозы кремации тел умерших с инкорпорированными при жизни радиоактивными материалами медицинского назначения

А.А. Шитова, Т.В. Пафомова, Ю.Е. Квачева*

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России,
Россия, 123098, Москва, ул. Живописная, 46

* Адрес для переписки: *tpafomova@fmbcfmba.ru*

Реферат. Современная технология кремации, разработанная еще в конце XIX века, в настоящее время применяется во все более возрастающих масштабах, что вызывает опасения по поводу потенциальных экотоксикологических угроз. Отдельную их категорию составляют радиоэкологические угрозы, возникновение которых объективно определяется широким внедрением в практику здравоохранения современных достижений ядерной медицины. Для предотвращения радиоэкологических последствий, связанных с кремацией тел пациентов, скончавшихся до окончания периода активности инкорпорированных при жизни радиоактивных материалов, наилучшей стратегией полагается проведение обязательных аутопсийных процедур с изъятием на вскрытии имплантированных радионуклидных источников либо органов, содержащих наибольшую остаточную радиоактивность. В Российской Федерации единый нормативный правовой акт, регулирующий процедуры посмертного обращения с телами умерших «радиоактивных пациентов», отсутствует, несмотря на то, что указания на их необходимость имеются в отдельных подзаконных нормативных правовых актах санитарного законодательства. Авторами обосновывается целесообразность его разработки.

Ключевые слова. Радиоэкология, экотоксикология, кремация, радиоактивные материалы, устройства медицинского назначения, аутопсийные исследования.

Radio-ecological threats of cremation of the deceased patient bodies with medical radioactive materials incorporated during life

A.A. Shitova, T.V. Pafomova, Yu.E. Kvacheva

State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical
Biological Agency,

46, Zhivopisnaya str., 123098, Moscow, Russian Federation

* Correspondence address: *fmbc@fmbamail.ru*

Abstract. Current cremation technology was developed in the late 19th century and is now being used on an ever-increasing scale, raising concerns about

potential eco-toxicological risks. Separate category is made up of radio-ecological threats, the emergence of which is objectively determined by the wide spread introduction of advanced achievements of nuclear medicine into healthcare practice. To prevent radio-ecological effects associated with the cremation of the bodies of patients who died before the end of the activity period of radioactive materials incorporated during life, the best strategy is to conduct mandatory autopsy procedures with removal of implanted radionuclide sources or organs containing the highest residual radioactivity during autopsy. In the Russian Federation, there is no single normative legal act to regulate the procedures for posthumous handling of the bodies of deceased “radioactive patients”, despite the fact that relevant requirements are contained in some by-laws of healthcare legislation. The authors substantiate the need to develop such an act.

Keywords. Radio-ecology, eco-toxicology, cremation, radioactive materials, medical devices, autopsy studies.

Практика кремации восходит к периоду неолита и широко распространена в ряде религий (индуизм, буддизм, синтоизм и др.). Одним из самых ранних известных примеров кремации считаются останки "Леди Мунго", найденные в дюнах одноименного озера в Австралии и датируемые, как полагают, давностью 40 000 лет. Современная технология кремации была разработана в конце XIX века как альтернативный способ решения проблемы рационального землепользования и с конца 1940-х годов применяется во все более возрастающих объемах. По данным исследования (Franco et al., 2022), в настоящее время в среднем около 70% населения земного шара отдают ей предпочтение в качестве способа погребения, хотя отмечены и значительные колебания по разным географическим регионам, связанные с различиями культурных и религиозных традиций. Так, в Японии этот показатель достигает 99%, в США – превышает 50%, в Израиле, напротив, частота проведения кремации чрезвычайно низка.

До недавнего времени кремация считалась наиболее экологичным способом погребения, однако за последние десятилетия возросло беспокойство по поводу выбросов, производимых крематориями как промышленными технологическими установками, способными в процессе термического разложения (сжигания) останков поддерживать температуру 850-1200°C. В значительной степени растущие экотоксикологические угрозы связываются с увеличением (до 42% и более) количества процедур кремации тел умерших людей с имплантированными при жизни устройствами медицинского назначения (Smith et al., 2012). В числе таковых, чаще всего, встречаются эндопротезы суставов, электрокардиостимуляторы, кардиовертеры-дефибрилляторы, имплантируемые циклические самописцы, инфузионные лекарственные помпы, нейростимуляторы, программируемые шунты для лечения гидроцефалии, ортониксические системы, стоматологические медицинские изделия (материалы) и т.п. К загрязняющим окружающую среду веществам, выделяемым при их сжигании, относят газообразные продукты сгорания (дымовые

газы), тяжелые металлы, полихлорированные дибензо-п-диоксины, дибензофураны и т.п., выбросы которых могут приводить к биоаккумуляции и потенциальному риску для здоровья человека.

Отдельную категорию потенциальных опасностей составляют радиоэкологические угрозы, обуславливаемые ростом масштабов внедрения в практику здравоохранения современных достижений ядерной медицины. Как отмечают Mahesh M. и соавторы (Mahesh et al., 2023), обобщившие данные по состоянию на 2023 г., совокупная численность диагностических и терапевтических процедур ядерной медицины, ежегодно выполняемых во всем мире с применением закрытых и открытых источников ионизирующего излучения (ИИИ), превышает 45 млн. Закрытые ИИИ наиболее широко применяются в онкологической практике для внутритканевой, внутрисполостной и аппликационной лучевой терапии злокачественных новообразований («брахитерапия»). Для каждой анатомической локализации злокачественного новообразования разработаны и утверждены соответствующие медицинские технологии, порядки, стандарты, клинические рекомендации по установке вводимых в пораженные ткани герметичных источников в виде медицинских изделий различной конфигурации (цилиндры, микросферы, иглы, гранулы, проволоки и др.), активность которых может различаться в значительных пределах. Так, для радиоисточников иглообразной формы ее показатели определяются величинами порядка 18.5-370 МБк, сферической формы («микросферы») – 34-370 МБк, цилиндрической формы – до 740-1480 МБк.

Открытые ИИИ, применяемые в настоящее время в диагностических целях, представлены преимущественно короткоживущими и ультракороткоживущими изотопами, в связи с чем в отношении них вопросы, обсуждаемые в настоящей статье, не представляются актуальными. Так, периоды полураспада ($T_{1/2}$) радионуклидов для диагностической визуализации гамма-камерами ОФЭКТ (одnofотонная эмиссионная компьютерная томография) составляют: технеций (Tc-99m) – 6.6 ч; йод-123 – 13.2 ч; индий-111 – 2.8 сут. На ПЭТ-сканерах (позитронная эмиссионная томография, или двухфотонная эмиссионная томография) чаще всего применяют позитрон-излучающие изотопы элементов второго периода Периодической системы: фтор-18 ($T_{1/2} = 109.8$ мин), углерод-11 ($T_{1/2} = 20.4$ мин), азот-13 ($T_{1/2} = 9.96$ мин), галлий-68 ($T_{1/2} = 68$ мин) и др. Большие периоды полураспада имеют открытые ИИИ, используемые для внутритканевой и внутрисполостной лучевой терапии. Они вводятся перорально (йод-131 – 8.04 сут; стронций-89 – 50.5 сут, фосфор-32 – 14.3 сут), внутривенно (лютеций-177 – 6.65 сут; радий-223 – 11.43 сут) либо непосредственно в ткань опухоли или лимфатические узлы (золото-198 – 2.69 сут, иттрий-90 – 2.67 сут). Суммарные величины вводимой активности при этом могут достигать значений порядка 3700-5000 МБк и более.

Для предотвращения потенциальных радиоэкологических угроз, связанных с кремацией тел пациентов, скончавшихся до окончания периода активности инкорпорированных при жизни радиоактивных материалов, наилучшей стратегией полагается проведение обязательных аутопсийных процедур с изъятием на вскрытии имплантированных радионуклидных источников либо

органов, содержащих наибольшую остаточную радиоактивность (Квачева, Ковалев, 2023). Одновременно обозначенная стратегия представляется самостоятельным элементом обеспечения радиационной безопасности персонала крематориев, случаи профессионального переоблучения которого были описаны в литературе ранее (Yu et al., 2019).

В отношении ряда наиболее широко используемых в медицинской практике радионуклидов Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) были рекомендованы следующие уровни остаточной радиоактивности тел умерших, допустимые для проведения кремации: для фосфора-32 – 30 МБк, стронция-89 – 20 МБк, иттрия-90 – 70 МБк, йода-131 – 400 МБк. Также МАГАТЭ были установлены уровни остаточной радиоактивности трупов, не требующие получения специального разрешения на производство аутопсии и захоронение тел (см. табл. 1).

Таблица 1. Допустимые уровни остаточной радиоактивности (МБк) тел умерших людей при применении в медицинских целях отдельных радионуклидов (по данным МАГАТЭ)

Table 1. Permissible levels of residual radioactivity (MBq) in the bodies of deceased individuals when certain radionuclides are used for medical purposes (according to the IAEA)

Радионуклид	Допустимый уровень остаточной радиоактивности, МБк		
	Аутопсия	Захоронение	Кремация
³² P (фосфор-32)	100	2000	30
⁸⁹ Sr (стронций-89)	50	2000	20
⁹⁰ Y (иттрий-90)	200	2000	70
¹³¹ I (йод-131)	10	400	400

Согласно отечественному нормативному правовому документу «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при внутритканевой лучевой терапии (брахитерапии) методом имплантации закрытых радионуклидных источников: Методические указания МУ 2.6.1.2712-10» в случаях исследования наступления смерти пациентов после проведения указанного медицинского вмешательства необходимо выполнить следующие мероприятия (МУ 2.6.1.2712-10, 2011).

1. В случае смерти пациента с имплантированными ИИИ во время его пребывания в медицинской организации, где проводилась брахитерапия, при патологоанатомическом исследовании имплантированные источники извлекаются из тела и передаются на пункт захоронения радиоактивных отходов в установленном порядке.

2. В случае смерти пациента с имплантированными ИИИ вне медицинской организации, патологоанатомическое исследование, захоронение и кремация тела разрешаются только после того, как общая остаточная активность уменьшится до уровня менее 4 ГБк, либо, если мощность эквивалентной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от тела умершего не будет превышать 10 мкЗв·ч⁻¹.

Вместе с тем, в действующих на сегодняшний день нормативных правовых актах (Приказ Минздрава РФ № 354н..., (2013); Приказ Минздрава РФ № 491н..., (2023)), регламентирующих проведение аутопсий в Российской Федерации, положения об особенностях исследований тел умерших людей с инкорпорированными при жизни радиоактивными материалами медицинского назначения, включая их дозиметрическое сопровождение, отсутствуют, что настоятельно диктует необходимость в создании единого нормативного правового документа.

Список литературы

Квачева, Ю.Е., Ковалев, А.В. (2023) Порядок проведения патологоанатомического и судебно-медицинского исследований тел умерших с инкорпорированными при жизни радиоактивными материалами медицинского назначения, *Медицинский вестник МВД*, т. 115, № 4, с. 74-79, doi: 10.52341/20738080_2023_125_4_74.

МУ 2.6.1.2712-10. (2011) *Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при внутритканевой лучевой терапии (брахитерапии) методом имплантации закрытых радионуклидных источников: методические указания*, Москва, Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 15 с.

Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 06.06.2013 г. № 354н (2013) «*О порядке проведения патолого-анатомических вскрытий*».

Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 25.09.2023 г. № 491н (2023) «*Об утверждении порядка проведения судебно-медицинской экспертизы*».

Franco, D.S., Georgin, J., Villarreal Campo, L.A., Mayoral, M.A., Goenaga, J.O., Fruto, C.M., Neckel, A., Oliveira, M.L., Ramos, C.G. (2022) The environmental pollution caused by cemeteries and cremations: A review, *Chemosphere*, vol. 307 (Pt 4), 136025, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136025.

Mahesh, M., Ansari, A.J., Mettler Jr., F.A. (2023) Patient exposure from radiologic and nuclear medicine procedures in the United States and worldwide: 2009-2018, *Radiology*, vol. 307(1), e221263, doi: 10.1148/radiol.221263.

Smith, T.O., Gitsham, P., Donell, S.T., Rose, D., Hing, C.B. (2012) The potential dangers of medical devices with current cremation practices, *Eur. Geriatric Med.*, vol. 3 (2), pp. 97-102, doi: 10.1016/j.eurger.2012.01.013.

Yu, N.Y., Rule, W.G., Sio, T.T., Ashman, J.B., Nelson, K.L. (2019) Radiation contamination following cremation of a deceased patient treated with a radiopharmaceutical, *JAMA*, vol. 321 (8), pp. 803-804, doi: 10.1001/jama.2018.21673.

References

Kvacheva, Yu.E., Kovalev, A.V. (2023) Poryadok provedeniya patologoanatomicheskogo i sudebno-medicinskogo issledovaniy tel umershih s inkorporirovannymi pri zhizni radioaktivnymi materialami medicinskogo naznacheniya [The procedure for conducting pathoanatomic and forensic medical examinations of the bodies of the deceased with radioactive medical materials incorporated during their lifetime], *Medicinskij vestnik MVD*, vol. 115, no. 4, pp. 74-79, doi: 10.52341/20738080_2023_125_4_74.

MU 2.6.1.2712-10. (2011) *Gigienicheskie trebovaniya po obespecheniyu radiacionnoj bezopasnosti pri vnutritkanevoj luchevoj terapii (brahiterapii) metodom implantacii zakrytyh radionuklidnyh istochnikov: metodicheskie ukazaniya* [Hygienic requirements for radiation safety during interstitial radiation therapy (brachytherapy) by implantation of closed radionuclide sources: guidelines], Federal'nyj centr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, Moscow, Russia, 15 p.

Prikaz Ministerstva zdravoohraneniya Rossijskoj Federacii ot 06.06.2013 g. № 354n «*O poryadke provedeniya patologo-anatomicheskikh vskrytij*» [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 354n dated 06.06.2013 "On the procedure for conducting pathological and anatomical autopsies"].

Prikaz Ministerstva zdravoohraneniya Rossijskoj Federacii ot 25.09.2023 g. № 491n «*Ob utverzhdenii poryadka provedeniya sudebno-medicinskoj ekspertizy*» [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 491n dated 25.09.2023 "On approval of the procedure for conducting a forensic medical examination"].

Franco, D.S., Georgin, J., Villarreal Campo, L.A., Mayoral, M.A., Goenaga, J.O., Fruto, C.M., Neckel, A., Oliveira, M.L., Ramos, C.G. (2022) The environmental pollution caused by cemeteries and cremations: A review, *Chemosphere*, vol. 307 (Pt 4), 136025, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136025.

Mahesh, M., Ansari, A.J., Mettler Jr., F.A. (2023) Patient exposure from radiologic and nuclear medicine procedures in the United States and worldwide: 2009-2018, *Radiology*, vol. 307(1), e221263, doi: 10.1148/radiol.221263.

Smith, T.O., Gitsham, P., Donell, S.T., Rose, D., Hing, C.B. (2012) The potential dangers of medical devices with current cremation practices, *Eur. Geriatric Med.*, vol. 3 (2), pp. 97-102, doi: 10.1016/j.eurger.2012.01.013.

Yu, N.Y., Rule, W.G., Sio, T.T., Ashman, J.B., Nelson, K.L. (2019) Radiation contamination following cremation of a deceased patient treated with a radiopharmaceutical, *JAMA*, vol. 321 (8), pp. 803-804, doi: 10.1001/jama.2018.21673.

Поступила в редакцию: 07.10.2025.

Доработана после рецензирования: 19.11.2025.

Для цитирования / For citation:

Шитова, А.А., Пафомова, Т.В., Квачева, Ю.Е. (2025) Радиоэкологические угрозы кремации тел умерших с инкорпорированными при жизни радиоактивными материалами медицинского назначения, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVI, № 3-4, с. 57-63, doi:0.24412/2782-3237-2025-3-4-57-63.

Shitova, A.A., Pafomova, T.V., Kvacheva, Yu.E. (2025) Radio-ecological threats of cremation of the deceased patient bodies with medical radioactive materials incorporated during life, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVI, no. 3-4, pp. 57-63, doi:0.24412/2782-3237-2025-3-4-57-63.

Ртуть в атмосферном воздухе в фоновых районах стран Северной, Центральной и Восточной Европы

Л.В. Бурцева, М.С. Александрова, Е.А. Позднякова, И.М. Брускина*

ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

*Адрес для переписки: mkotorova.igce@gmail.com

Реферат. Рассмотрены результаты мониторинга концентраций ртути в атмосферном воздухе заповедных зон стран Северной, Центральной Европы и Европейской части России, в период 2011-2015 г. и 2021 г. Показано, что современные оценки и полученные в 1980-е годы, соизмеримы. В атмосфере по-прежнему доминирует газообразная форма ртути. Вклад аэрозольной составляющей не превышает 0.6% общего содержания элемента. По данным, полученным в арктических районах, современный уровень глобального фона ртути в атмосфере северного полушария составляет 1.5-1.7 нг/м³. В странах Северной и Центральной Европы, а также на западе и востоке Восточно-Европейской равнины региональные концентрации сравнимы с оценками глобального фона, стабильны во времени, однородны в географическом пространстве. В центральной части Восточно-Европейской равнины средние концентрации почти в 2 раза выше глобального фона. В целом, в атмосфере исследуемых регионов Европы фоновые концентрации ртути крайне низкие, составляют в среднем не более 1.2% нормы ПДК, принятой в России, и формируются, главным образом, природными источниками эмиссии ртути в атмосферу.

Ключевые слова. Фоновый мониторинг, атмосферный воздух, концентрация, ртуть, пространственно-временная изменчивость.

Mercury in the atmospheric air in the background areas of the Nordic countries, Central and Eastern Europe

L.V. Burtseva, M.S. Aleksandrova, E.A. Pozdnyakova, I.M. Bruskin*

Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: mkotorova.igce@gmail.com

Abstract. The results of monitoring mercury concentrations in the atmospheric air of the protected areas of the countries of Northern, Central Europe

and the European part of Russia in the period 2011-2015 and 2021 are considered. It is shown that the current estimates and those obtained in the 1980^s are commensurate. The gaseous form of mercury still dominates the atmosphere. The contribution of the aerosol component does not exceed 0.6% of the total content of the element. According to the data obtained in the Arctic regions, the current level of the global background of mercury in the atmosphere of the northern hemisphere is 1.5-1.7 ng/m³. In the countries of Northern and Central Europe, as well as in the west and east of the East European Plain, regional concentrations are comparable to estimates of the global background, stable over time, and homogeneous in geographical space. In the central part of the East European Plain, the average concentrations are almost 2 times higher than the global background, which, as the analysis showed, is due to the influence of the Moscow metropolis. In general, background concentrations of mercury in the atmosphere of the studied regions of Europe are extremely low, averaging no more than 1.2% of the MPC norm adopted in Russia, and are formed mainly by natural sources of mercury emissions into the atmosphere.

Keywords. Background monitoring, atmospheric air, concentration, mercury, spatial and temporal variability.

Введение

Ртуть, по степени токсичности, возглавляет ряд самых опасных загрязняющих окружающую среду металлов. Ртуть среди них является единственным глобальным загрязняющим веществом, присутствует в атмосфере, главным образом, в элементарной форме, отличается низкой растворимостью в воде, длительным периодом жизни в атмосфере (от 0.8 месяца до 1.7 года) и в результате распространяется на большие расстояния (Gonzalez-Raymat et al., 2017). Широко используется в большом числе технологических циклов, неизбежно сопровождающихся антропогенной эмиссией элемента в атмосферу.

По оценкам Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП) техногенная эмиссия ртути на 2010 г. в глобальном масштабе составляла 1960 т/год (средняя величина диапазона 1010-4070 т/год) (Штайнер, 2013). Её источниками являются процессы: переработки руд; сжигания каменного угля, газа, сланцев, биотоплива, бытовых отходов; производства цветных и других металлов, цемента, извести, хлора и др.; использование пестицидов, биоцидов, красок и др. В России общая эмиссия ртути в атмосферу предприятиями черной металлургии в 2001 г. оценивалась примерно в 2 т/год (Янин, 2004б). Объемы выбросов ртути в атмосферу из антропогенных источников в 2015 году составил 2220 т, диапазон вариации 2000-2820 т. (GMA-2018, 2019). Преимущественная доля антропогенной эмиссии ртути в 2015 приходилась на кустарную и мелкомасштабную добычу золота (37.7%) 838 т (диапазон вариации 675-1000 т), на сжигание угля – 13.1%, 292 т (диапазон вариации 255-346 т), на производство цемента – 10.5% (сырье и топливо, без угля) 233 т (диапазон вариации 117-782 т).

Природная эмиссия ртути на 2008 г. оценивалась в 5207 т/год, из них 2682 т – поступление из океана, 96 т – из озер, 888 т – от лесных массивов и пустошей, 128 т – от сельскохозяйственных территорий, 765 т – в результате лесных пожаров и вулканических выбросов (Pittone et al., 2010). Объемы природной эмиссии ртути в 2015 году практически не изменились и составили по данным GMA-18 (2019) около 5500 т/год.

Проблема загрязнения ртутью природной среды привлекает пристальное внимание исследователей более 50-ти лет. Триггером широкомасштабных исследований загрязнения окружающей среды ртутью послужили привлекавшие внимание мировой общественности массовые отравления национального масштаба: в 50-х годах прошлого века в японском городе Минамата, в 1970 г. в Онтарио, в 1959-1960 гг. и зимой 1971-1972 г. в Ираке (Конюхова, 2017). На основе полученных результатов разработан ряд предложений по снижению поступления ртути в окружающую среду. В ЮНЕП была принята программа по ртути, в рамках которой разработана «Международная Минаматская конвенция по ртути», принятая и подписанная рядом стран в 2013 году, вступившая в силу в 2017 г. Россия подписала конвенцию в 2014 г.

Конвенция обязывает страны не только регулировать использование ртути в промышленности, в медицинских и бытовых приборах, но и осуществлять сотрудничество в деле «географически репрезентативного» мониторинга уровней ртути и ртутных соединений в компонентах окружающей среды (статья 19)¹⁾.

Исследования, выполненные 1980-е годы, показали, что ртуть, поступающая в атмосферу от источников эмиссии, расположенных на Европейском континенте, достигает арктических широт и депонируется там (Brosset, 1987). Поэтому мониторинг загрязнения ртутью приземной атмосферы актуален как для территорий, где расположены источники ее эмиссии, так и на большом расстоянии от них, в так называемых фоновых районах, для оценки эффективности мероприятий Минаматской конвенции.

В поддержку конвенции действует глобальная сеть наблюдений за ртутью (GMOs), собирающая данные о концентрациях ртути в атмосферном воздухе, осадках и поверхностных водах по всему миру для оценки глобальных тенденций загрязнения ртутью (по данным, полученным в фоновых районах) и выявления аномальных ситуаций²⁾.

К 2000-ным годам уже существовали международные сети мониторинга загрязнения окружающей среды, работающие по программам наблюдений за ртутью: ЕМЕП (Совместная программа наблюдения и оценки распространения загрязнителей воздуха на большие расстояния в Европе), действующая в рамках Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния, (Конвенция о трансграничном..., 1979); АМАП – программа мониторинга и оценки Арктики (Программа мониторинга..., 1991); КФМ –

¹⁾ https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/information_document/Minamata-Convention-booklet-rus-full.pdf.

²⁾ <https://msceast.org/general-information-ru/programma-emep>; <https://www.unep.org/gmos>

Комплексный фоновый мониторинг, организованный в конце 1970-х – начале 1980-х гг., на заповедных территории бывших стран СНГ³⁾. В настоящее время КФМ реализуется в России, как блок государственного мониторинга загрязнения окружающей среды Росгидромета (Громов, Парамонов, 2015).

С 1999 года наблюдения за ртутью стали частью программы ЕМЕП в Европе. Географический охват за наблюдениями включал территории стран Северной и Центральной Европы и Европейской территории России. Однако вследствие финансовых сложностей к настоящему времени лишь ограниченное число станций ЕМЕП и КФМ проводят мониторинг ртути в атмосфере.

В системе КФМ систематические долговременные измерения суммарной ртути на действующей фоновой станции в Приокско-Тerrasном государственном биосферном заповеднике, а также эпизодические рекогносцировочные измерения на территориях планируемого размещения станций КФМ осуществляются на Восточно-Европейской равнине.

К настоящему времени накоплен большой массив данных о содержании различных форм ртути в атмосфере и атмосферных осадках. Данные, полученные на станциях ЕМЕП, публикуются в ежегодных отчетах⁴⁾ (Heavy metal and POP..., 2017), в системе КФМ аккумулируются в банке данных – «Фоновый мониторинг» Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ) (Бурцева и др., 2021; Бурцева, 2022).

Одна из объединяющих ЕМЕП и КФМ задач – установить базовый (фоновый) уровень загрязнения атмосферного воздуха, его пространственную и временную изменчивость на региональном и глобальном уровне компонентами, включающими ртуть. В соответствии с этой задачей выполнен сравнительный анализ полученных в 2011-2015 гг. и 2021 г. концентраций ртути в атмосферном воздухе, характеризующих состояние фонового загрязнения атмосферы ртутью в обширных регионах Европы, в которых реализуются программы ЕМЕП и КФМ. Результаты анализа представлены в настоящей работе.

Информационная и методическая база

В системах ЕМЕП и КФМ приняты единые критерии выбора месторасположения станций наблюдения, которые состоят в следующем: удаление от крупных источников загрязнения (города, электростанции, главные дороги) на 50 км; от малых дорог, маломощных систем домашнего отопления углем, мазутом или дровами минимум на 500 м (ЕМЕР Manual for Sampling..., 2001). Таким критериям отвечают природные заповедные территории, в частности, Государственные биосферные заповедники.

В России региональная станция наблюдения КФМ работает в Московской области, на территории Приокско-Тerrasного государственного биос-

3) Комплексный фоновый мониторинг состояния и загрязнения природной среды (КФМ) (Integrated background monitoring of environmental pollution (IBMon)) – ИГКЭ, <http://www.igce.ru/ibmon/>

4) <https://ebas.nilu.no/>

ферного заповедника, охранный зона которого – 4683 га. Расположена в 83 км к югу от Москвы (мегаполис) и в 70 км от г. Подольска (население – 312 400 чел.). В 75 км на юг от ГБЗ – промышленно-развитый г. Тула (областной центр, население – 542 516 человек), в 12 км на запад – г. Серпухов (население – 133 645 человек⁵⁾). В г. Серпухове высокотемпературные источники антропогенной эмиссии ртути отсутствуют. В г. Подольске функционирует завод по производству цемента, в выбросах которого, как правило, присутствует ртуть (Янин, 2004а).

Рекогносцировочные измерения выполнялись на будущих станциях КФМ на территориях Национального Парка «Смоленское Поозерье» и Волжско-Камского государственного биосферного заповедника. Станция «Национальный парк Смоленское Поозерье» расположена в Смоленской области, на западе Восточно-Европейской равнины, в зоне смешанных лесов, Волжско-Камский государственный биосферный заповедник – на территории Республики Татарстан, в 60 км к югу от столицы (г. Казань), на берегу Куйбышевского водохранилища, в зоне лесных и лесостепных экосистем среднего Поволжья.

Измерения концентраций ртути в атмосферном воздухе фоновых районов в рамках программы ЕМЕП в 2011-2015 гг. и 2021 г. проводились на территориях 11 стран северной и центральной Европы. Наиболее полные массивы данных получены на фоновых территориях 7 стран на 2-х глобальных и на 14-ти региональных станциях наблюдения (табл. 1). Станции, идентифицируемые, как «глобальные» расположены в Арктическом регионе. В настоящей работе использованы данные за рассматриваемый период, представленные в отчетах ЕМЕП (Heavy metal and POP..., 2017; Aas, Breivik, 2013; Aas, Bohlin-Nizzetto, 2014; 2017; Aas, Nizzetto, 2015; Aas et al., 2016) и в банке данных «Фоновый мониторинг» (Бурцева и др., 2021; Бурцева, 2022).

При едином подходе в выборе мест размещения станций наблюдения существуют значительные различия между странами в средствах и методах измерений ртути.

По программе ЕМЕП в разных странах, в зависимости от используемой аппаратуры, проводятся измерения ежесуточные, недельные, часовые, с непостоянным годовым массивом данных. Используется два способа измерения ртути. Первый – газоанализатором Tekran-2537X, фиксирующим концентрацию в заданном интервале времени, второй – накоплением ртути на золотом сорбенте, аналогично методу КФМ. Газоанализатором Tekran-2537X при разном времени экспозиции измерялась: общая газообразная ртуть, включающая пары металлической ртути, газообразные органические и неорганические соединения, среднечасовая газообразная, аэрозольная и реакционноспособная (Heavy metal and POP..., 2017). Из массива данных ЕМЕП использованы значения концентраций общей газообразной ртути и аэрозольной. Большой объем массива данных за шестилетний период позволяет, в некоторой степени, нивелировать существующие различия в программах измерений на станциях ЕМЕП.

⁵⁾ <https://rosstat.gov.ru>

Таблица 1. Станции фонового мониторинга концентраций ртути в воздухе

Table 1. Background monitoring stations for mercury in the air

Регион	Территория	Станция	Статус станции
Арктика	1. Гренландия	Nord	Глобальная
	2. о. Шпицберген	Zeppelin	Глобальная
Северная Европа	3. Великобритания	Harwell	Региональная
		Auchencorth Moss	Региональная
	4. Норвегия	BirkenesII	Региональная
		Andöya	Региональная
	5. Швеция	Bredkälén	Региональная
		Rao	Региональная
	6. Финляндия	Pallas	Региональная
		Waldhof	Региональная
Центральная Европа	7. Германия	Schauinsland	Региональная
		Schmücke	Региональная
		Zingst	Региональная
		Kosetice	Региональная
	8. Чехия	Kosetice	Региональная
	9. Польша	Diabla Gora	Региональная
Восточно-Европейская равнина	10. Россия, Московская область	Приокско-Террасный ГЗ	Региональная

Программой КФМ для стационарной станции установлено измерение суточных концентраций ртути. Анализируемый массив данных за 6 лет – 720 среднесуточных концентраций ртути. Рекогносцировочные измерения среднесуточных концентраций ртути проводились в летний период.

В системе КФМ измерение концентраций ртути проводились следующим образом. Ртуть из атмосферного воздуха в течение суток осаждалась на серебряном сорбенте пробоотборной ловушки. В лаборатории ртуть в процессе десорбции переносилась проходящим через усилительно-измерительный тракт газо-ртутного анализатора потоком воздуха на золотой сорбент. Осевшая ртуть измерялась беспламенным ААС методом. Такой способ позволил проводить концентрирование всех форм газообразной ртути из исходного объема воздуха (1.5 м³) более, чем в 700 раз, что повышает точность анализа (РД 52.44.591-2015, 2015).

Показатели скорости и направления ветра за 2021 г. получены из архива результатов наблюдений метеорологической станции «Приокско-Террасный заповедник» (станция 5493780). Статистическая обработка результатов выполнена в программе Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

Определение форм ртути в атмосферном воздухе и их доли в общем содержании элемента – актуально не только вблизи источников эмиссии, но и

в фоновых районах. Формы ртути различаются по своим физико-химическим свойствам, что оказывает влияние на их поведение в атмосфере и на механизмы переноса между средами. В 1990-х годах доля ртути в выбросах, поступающих в атмосферу в виде частиц, оценивалась в 13% (Расуна, Munch, 1991) и 5-6% по оценке (GMA-2018, 2019), а время жизни – в 3-5 дней, что исключает её участие в дальнейшем переносе.

Форма ртути, идентифицируемая, как аэрозольная, образуется в результате сорбции газообразной ртути на атмосферных аэрозольных частицах, в особенности на частицах сажи (Lindqvist et al., 1991). Ртуть становится нереклаксационноспособной, выводится из атмосферы с аэрозолем в процессе сухого осаждения или вымывания осадками, поступает в другие природные среды (Seigneur et al., 1996).

По данным, полученным в фоновых районах мира в 1980-х годах (Петрухин и др., 1986), аэрозольная ртуть от общего содержания элемента в воздухе составляла 5.5% в зарубежной Европе, 7.4% на Европейской Чasti России, 2.25% в Северной Америке, 6.6% в Северной части Атлантики. В фоновых районах России в районе оз. Байкал в 1996 г. оценки были существенно ниже: в летний период – 0.68-0.86%, в зимний – 1.46-1.8% (Leermakers et al., 1996), что дает среднегодовое значение 1.2%. В 2016-2017 гг. в акватории оз. Байкал среднегодовая оценка доли аэрозольной ртути составила 0.7% (Машьянов и др., 2022).

На станциях ЕМЕП в 5 странах Европы в 2011-2015 гг. и в 2021 г. одновременно измерялись концентрации общей газообразной и аэрозольной ртути. Измерения проводились в Великобритании – 2 года, в Финляндии, – 4 года, в Швеции – 6 лет, в Германии и Чехии – 3 года, что позволило рассчитать современные среднегодовые оценки вклада аэрозольной формы в общее содержание ртути в приземной атмосфере в различных районах Европы.

Расчеты показали, что доля аэрозольной ртути в фоновых районах Северной и Центральной Европы значительно ниже 1% её общего содержания в атмосфере и изменяется год от года в узких стабильных во времени диапазонах: в Великобритании, Финляндии, Чехии от 0.1% до 0.19%, в Германии от 0.43% до 0.48%. Менее стабильна аэрозольная составляющая в фоновых районах Швеции – 0.09-0.56%, что подтверждает заметную неоднородность аэрозольной ртути в пространстве.

Сравнение полученных современных оценок с оценками 80-90-х годов свидетельствует о постепенном снижении доли аэрозольной ртути в атмосфере. Можно предположить, что в соответствии с принятыми международными экологическими решениями в Европе произошло уменьшение массы аэрозольных частиц антропогенного происхождения в целом. Об этом свидетельствует значительное снижение, например, концентраций аэрозолей свинца, кадмия в атмосфере Европы (Бурцева, Конькова, 2016). Кроме того, современные методические и технические возможности позволяют проводить более точные измерения различных форм ртути. Таким образом, незначительный вклад аэрозольной формы в общее содержание ртути в атмосферном воздухе фоновых районов Европы подтверждает доминирующую позицию

газообразной формы, концентрации которой являются основным показателем фонового загрязнения атмосферы ртутью.

В 80-90-е годы в качестве «фоновых» рассматривались, главным образом, арктические районы и акватории морей и океанов, куда ртуть антропогенного происхождения поступает в результате дальнего переноса с наибольшей вероятностью. Наиболее интенсивно измерения концентраций общей газообразной ртути проводились в Арктике. Были получены следующие оценки: 0.47-1.6 нг/м³ – в акватории Баренцева моря, 0.37-0.97 нг/м³ – Карского, 0.2-1.9 нг/м³ – на п-ове Таймыр, 0.75-2.52 нг/м³ – на о. Шпицберген, 0.8-1.8 нг/м³ – на побережье Норвегии, 0.03-2.5 нг/м³ – на северном побережье Канады (Бурцева и др., 1998).

В 2001-2011 гг. на побережье Карского моря вблизи границы Европы и Азии, по данным долговременного мониторинга, среднегодовые концентрации составляли 1.32-1.79 нг/м³ (Панкратов и др., 2013). В 2010-2013 годах были выполнены измерения газообразной ртути в приводном слое атмосферы над дальневосточными морями – Беринговом, Охотским, Японским и в северо-западной части Тихого океана. Концентрации ртути изменялись с юга на север и с запада на восток от 0.3 до 5.1 нг/м³. Среднее значение составило 1.5±0.5 нг/м³ (Калинчук, 2015).

Принимая во внимание близость значений приведенных концентраций и учитывая районы их измерений, можно констатировать, что они характеризуют глобальный фоновый уровень содержания ртути в приземном слое атмосферного воздуха. Среднее значение для северного полушария по мировым данным оценивается в 1.5-1.7 нг/м³ (Lindberg et al., 2007).

Фоновое загрязнение ртутью атмосферного воздуха в континентальной части Европы и в двух арктических районах за период 2011-2015 гг. и 2021 г. были охарактеризованы средними значениями концентраций общей газообразной ртути в атмосферном воздухе (рис. 1) и показатели вариабельности исходных данных (рис. 2). Средние значения концентраций для каждой из стран-участниц программ ЕМЕП и КФМ рассчитывались по совокупному массиву данных, полученных на фоновых станциях (табл. 1), коэффициенты вариации – по годовым массивам исходных данных.

Сравнение современных средних оценок с аналогичными оценками, полученными в предшествующие периоды, показывает, что глобальный фоновый уровень концентраций ртути в приземном воздухе в северном полушарии продолжает сохраняться в диапазоне 1.5-1.7 нг/м³ (Гренландия, о. Шпицберген, рис. 1). Средние фоновые концентрации в западном континентальном секторе рассматриваемого европейского региона практически однородны в пространстве и сравнимы с оценками глобального фона. На территориях Великобритании, Швеции, Финляндии и Польши наблюдается небольшое понижение относительно глобального уровня. Концентрации ртути в центральной части Восточно-Европейской равнины (в Приокско-Террасном заповеднике) почти в 2 раза превышают глобальный уровень в заповедных территориях.

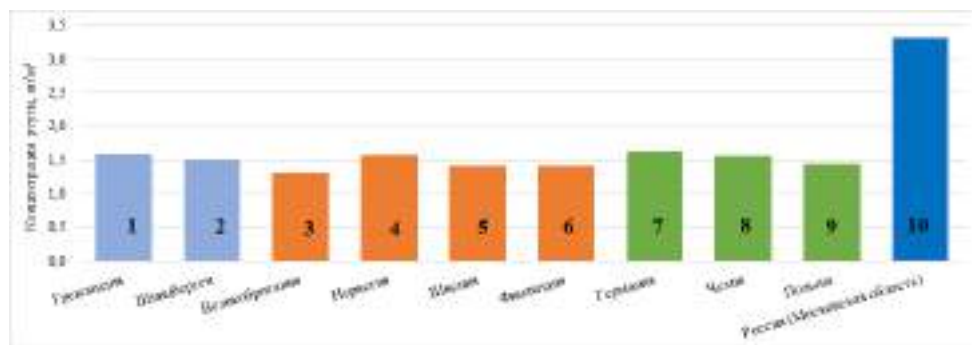


Рисунок 1. Средние за период 2011-2015 гг. и 2021 г. концентрации ртути в атмосферном воздухе в районах Арктики (1, 2), Северной (3-6), Центральной (7-9) и Восточной частей Европы (10)

Figure 1. Average mercury concentrations in air for the period 2011-2015, 2021 in the Arctic (1, 2), Northern (3-6), Central (7-9) and Eastern parts of Europe (10)

Изменчивость разовых концентраций в годовых циклах периода 2011-2021 гг., оцениваемая коэффициентом вариации ниже 20% (рис. 2), подтверждает статичность состояния регионального фоновое загрязнения атмосферы ртутью в Северной Европе, включающей Великобританию и Скандинавские страны. Колебания разовых концентраций ртути в атмосфере фоновых районов стран Центральной Европы происходят в более широком диапазоне, чем в странах Северной Европы. На территории Чехии коэффициент вариации разовых фоновых концентраций год от года изменяется от 0.1 до 0.9. В Приокско-Террасном заповеднике диапазон изменчивости за весь представленный период значительно шире (рис. 2).

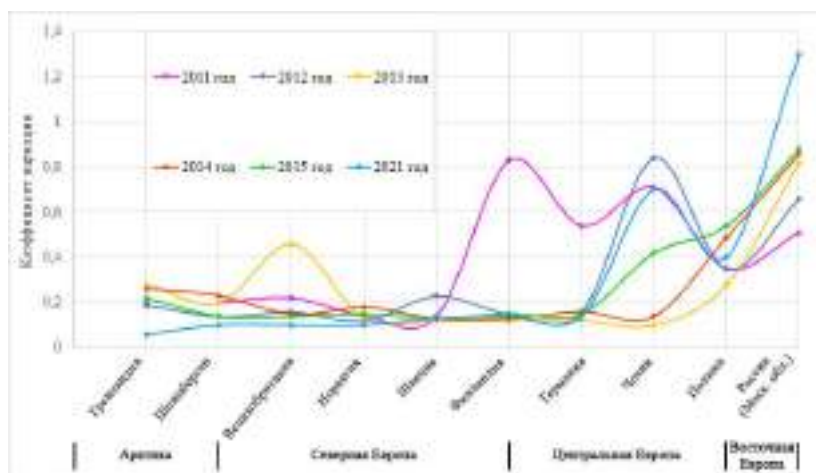


Рисунок 2. Коэффициенты вариаций разовых концентраций ртути в годовых циклах в фоновых районах Арктики, Северной, Центральной и Восточной Европы

Figure 2. Coefficients of variation of single mercury concentrations in annual cycles in the background regions of the Arctic, Northern, Central and Eastern Europe

Заметна дифференциация территорий в географическом пространстве и по значениям максимальных разовых концентраций в годовом цикле (табл. 2). На побережье Гренландии (западное полушарие) максимальные разовые концентрации примерно в 2 раза выше, чем на о. Шпицберген, В Северной и Центральной Европе – в своем большинстве не выходят за границы интервала 1.5-3.2 нг/м³. В центре Восточно-Европейской равнины максимальные разовые значения значительно выше, чем в Северной и Центральной Европе и сопоставимы с экстремальными значениями, наблюдавшимися в Великобритании в 2012 г., в Чехии в 2015 г., а также на побережье Карского моря в 2007 г. (Панкратов и др., 2013). При этом на территориях стран, независимо от региона, максимально разовые концентрации стабильны год от года, за исключением Великобритании и Чехии.

Таблица 2. Максимальные разовые концентрации ртути в атмосферном воздухе стран Арктики, Северной, Центральной и Восточной Европы

Table 2. Maximum one-time concentrations of mercury in the atmospheric air of the countries of Northern, Central and Eastern Europe

Регион	Территория	Число станций	Концентрации, нг/м ³					
			2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2021 г.
Арктика	Гренландия	1	-	4.13	4.8	4.48	5.0	1.5
	о. Шпицберген	1	2.9	2.4	2.4	2.4	2.46	-
Северная Европа	Великобритания	2	2.2	18.4	1.5	-	4.16	1.7
	Норвегия	2	4.3	2.9	2.3	3.13	2.79	1.5
	Швеция	2	3.2	2.2	2.0	2.1	2.8	-
	Финляндия	1	2.8	-	1.7	1.7	2.2	2.2
Центральная Европа	Германия	4	3.0	3.2	3.1	3.0	2.7	2.0
	Чехия	1	5.7	3.0	-	-	13.9	-
	Польша	1	3.0	3.4	2.8	3.0	3.8	-
Восточная Европа	Московская обл. ПТГЗ*	1	13.7	16.0	16.0	18.0	14.0	15.1

Примечание: * – Приокско-Тerrasный государственный заповедник

Особенности изменчивости фоновых концентраций в географическом пространстве демонстрируют результаты измерений, выполненных одновременно в летние месяцы 2012, 2014 и 2015 гг. на станциях ЕМЕП, КФМ и при рекогносцировочных обследованиях Волжско-Камского заповедника и Национального Парка «Смоленское Поозерье» (рис. 3). На фоне устойчивого, практически однородного уровня концентраций в Арктике, Северной и Центральной Европе, пространственной неоднородностью концентраций ртути выделяется Восточно-Европейская равнина. На западе и востоке равнины в 2012 и 2015 гг. концентрации ртути были близки к оценке глобального фона, в центральной части наблюдалось значительное превышение глобального фона в 2012 и 2014 гг. и на востоке в 2014 г.

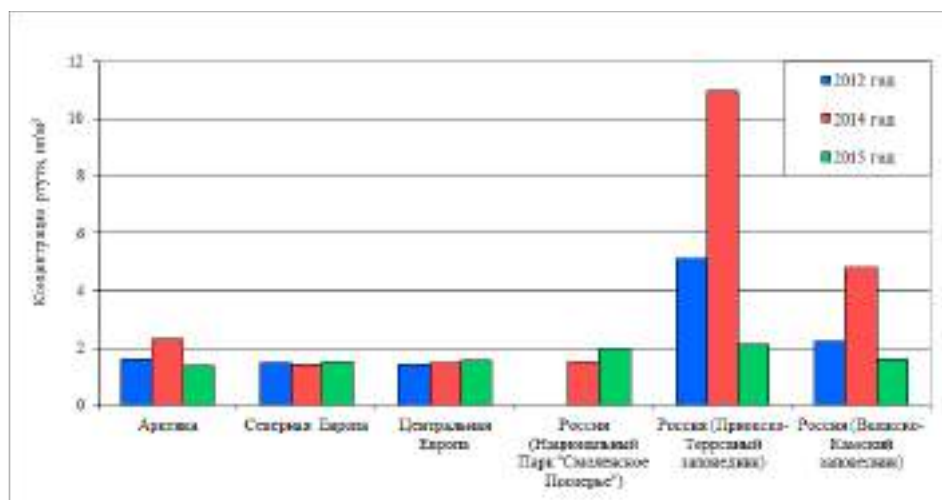


Рисунок 3. Концентрации ртути, измеренные одновременно в летние месяцы 2012, 2014 и 2015 гг. на станциях ЕМЕП и КФМ в Арктике, Северной и Центральной Европе

Figure 3. Mercury concentrations measured simultaneously in the summer months of 2012, 2014 and 2015 at EMEP, CBM Arctic, Northern, Central and Eastern Europe

Отметим, что также наблюдалось явное межрегиональное различие в сезонной изменчивости концентраций общей ртути (рис. 4). В Северной и Центральной Европе различие концентраций в холодное и теплое полугодие выражено слабо. В Арктике фоновые концентрации в теплое полугодие незначительно выше, чем в холодное и существенно выше на территории Восточно-Европейской равнины.

Анализ внутригодовой изменчивости среднемесячных концентраций ртути, осредненный за весь рассматриваемый период, на территории Приокско-Террасного заповедника показал чётко выраженную сезонность. Самые низкие концентрации, совпадающие с глобальными оценками, характерны для холодного периода – январь, февраль, ноябрь и декабрь – $1.8-2.0 \text{ нг/м}^3$. Концентрации постепенно возрастают до 5.6 нг/м^3 в течение весны, сохраняются в интервале $4-6.2 \text{ нг/м}^3$ в летние месяцы – июнь, июль, август, далее постепенно возвращаются на уровень глобальных оценок.

Совместное рассмотрение преимущественного направления приземного ветра в каждый месяц 2021 года и среднемесячных концентраций ртути показало следующее. С июня по сентябрь преимущественное направление ветра северное, то есть от мегаполиса (Москва, 83 км) и г. Подольска в сторону Приокско-Террасного заповедника, средняя за этот период концентрация составила 2.1 нг/м^3 . Западные ветры, направленные от г. Серпухова (12 км) к Приокско-Террасному заповеднику характерны для февраля, марта, октября и ноября, средняя концентрация ртути – 1.5 нг/м^3 . В январе, апреле, мае, октябре и ноябре преимущественно ветры южной четверти – от г. Тулы (85 км) к Приокско-Террасному заповеднику, средняя концентрация ртути – 0.83 нг/м^3 . Внутригодовая изменчивость концентраций ртути в воздухе Приокско-Террасного заповедника в 2021 г. явно совпадает с описанной выше внутригодо-

вой изменчивостью концентраций, средних за весь рассматриваемый период. Из этих оценок следует, что направленность приземного ветра оказывает существенное влияние на содержание ртути в воздухе на территории Приокско-Террасного заповедника. Концентрация ртути возрастает в наибольшей степени при ветрах со стороны г. Подольска и мегаполиса, то есть при ветрах, характерных для теплого периода года, что можно в значительной степени объяснить влиянием московской городской агломерации.

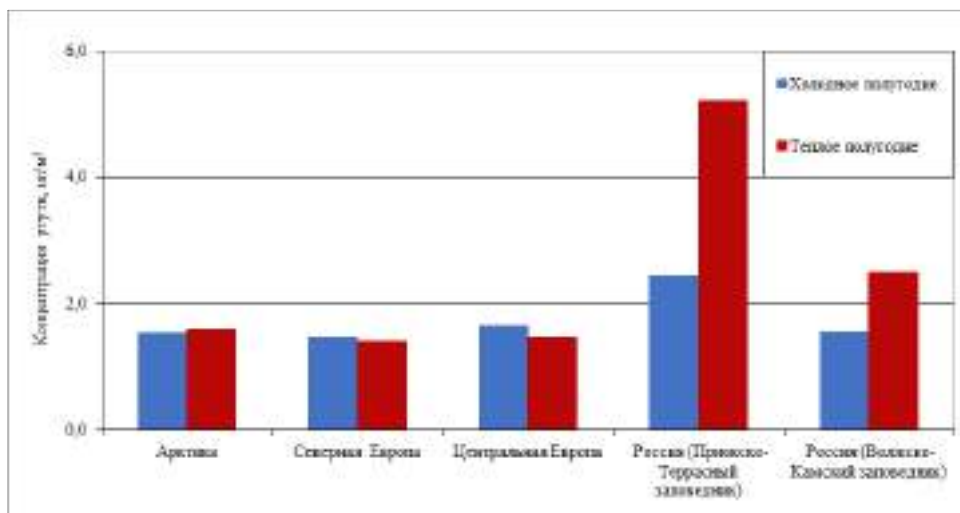


Рисунок 4. Средние за период 2011-2015 концентрации ртути в атмосферном воздухе в холодное и теплое полугодие в регионах Европы

Figure 4. Average mercury concentrations in atmospheric air in the cold and warm half-years in European regions for the period 2011-2015

Таким образом, результаты анализа современных фактических данных показали, что при однородности средних оценок, характеризующих фоновое содержание ртути в атмосфере на большей части европейской территории, существуют индивидуальные, мелкомасштабные особенности изменчивости разовых концентраций элемента во времени и средних концентраций в географическом пространстве.

Необходимо отметить, что рассматриваемые регионы (табл. 1) находятся в разных природно-географических условиях, формирующих климатические особенности территорий. А территории рассматриваемых стран имеют различную плотность размещения и мощность источников антропогенной эмиссии ртути в атмосферу, то есть различную антропогенную нагрузку. Северная Европа омывается Атлантическим и Северным Ледовитым океанами, с юга – Балтийским морем, что формирует климат региона умеренный и более мягкий морской со сглаженной сезонностью на западе, и субарктический на северо-востоке. В Центральной Европе в Германии климат умеренный и морской, в Польше и Чехии – умеренный, в центре Восточно-Европейской равнины – континентальный с четко выраженными сезонами года.

Поступление ртути из океана, составляющее основную долю мировой природной эмиссии (Pirrone et al., 2010), является мощным фактором стабили-

зации содержания ртути в атмосфере, способствующим сокращению амплитуды колебаний разовых концентраций, сглаживанию сезонной и пространственной их изменчивости в фоновых районах стран Северной Европы.

На внутриконтинентальных территориях Европы стабилизирующая роль океанического источника эмиссии ртути сокращается. Возрастает роль местных источников эмиссии ртути и таких природно-географических факторов, как климат, определяющий особенности метеорологических процессов, рельеф местности, природные ресурсы территории и другие. Под их влиянием формируются особенности фонового загрязнения ртутью атмосферы на конкретных территориях, что и продемонстрировали результаты анализа данных, изложенные выше.

Выводы

Сравнительный анализ данных мониторинга содержания ртути в приземном воздухе в фоновых районах части европейской территории за период 2011-2015 и 2021 гг. с идентичными данными, полученными в 1980-х годах, выявил следующие особенности современного состояния фонового загрязнения атмосферы ртутью в странах Северной, Центральной Европы (ЕМЕП) и в России на Восточно-Европейской равнине (КФМ).

На изменчивость регионального фонового загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха ртутью оказывают влияние природно-географические особенности территорий стран. Континентальный климат, с четко выраженными сезонами года, расширяет границы изменчивости концентраций ртути в атмосфере центральной части Восточно-Европейской равнины.

Вклад аэрозольной ртути в общее её содержание в атмосфере фоновых районов Европы за более чем 30-летний период, постепенно снижаясь, достиг уровня 0.1-0.6%, что подтверждает доминирующую позицию газообразной формы для оценки фонового загрязнения атмосферы ртутью.

Средние оценки глобального фонового уровня концентраций газообразной ртути в приземном воздухе в северном полушарии в арктических районах (Гренландия, о. Шпицберген) в настоящее время, как и в 1980-х годах, сохраняются на уровне 1.5-1.7 нг/м³. Средние концентрации в фоновых районах стран Северной и Центральной Европы практически однородны в пространстве, сравнимы с оценками глобального фона и стабильны во времени.

На Восточно-Европейской равнине явно выражена пространственная неоднородность. На западе, в Национальном Парке «Смоленское Поозерье» и на востоке в заповедной зоне Татарстана концентрации близки концентрациям, наблюдаемым в Северной и Центральной Европе, в центре (заповедная территория в Московской области) средние концентрации почти в 2 раза выше. Здесь рост концентраций происходит при характерных для теплого периода года северных ветрах.

Годовые максимальные концентрации, в своем большинстве, не выходят за границы интервала 1.5-3.2 нг/м³ в фоновых районах стран Северной и Цен-

тральной Европы. Аналогичные оценки в центре Восточно-Европейской равнины составляют 13.7-18.0 нг/м³ и характеризуют возможный верхний предел концентраций в фоновых районах плотно населенных территорий, в которых заповедные зоны расположены на расстоянии не более 50 км от мегаполисов.

Сезонная изменчивость содержания ртути в атмосфере фоновых районов различается в географическом пространстве. В странах Северной и Центральной Европы концентрации ртути в холодное и теплое полугодие отличаются незначительно. В центре и на востоке Восточно-Европейской равнины закономерность ярко выраженная: концентрации ртути в теплое полугодие в 2 раза выше, чем в холодное.

На состояние регионального фонового загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха ртутью оказывают влияние природно-географические особенности территорий стран. Стабилизирующее влияние Атлантического океана особенно заметно в странах Северной Европы. Континентальный климат, с четко выраженными сезонами года, расширяет границы изменчивости концентраций ртути в атмосфере центральной части Восточно-Европейской равнины.

В целом в рассмотренном регионе Европы современные фоновые концентрации ртути в атмосферном воздухе крайне низкие, составляют в среднем не более 1.2% нормы ПДК, принятой в России (300 нг/м³). На территориях стран, независимо от региона, фоновые концентрации ртути стабильны в течение длительного времени.

Снижение антропогенной эмиссии элемента в атмосферу в результате принятия ограничительных решений было в Европе и Северной Америке, но при этом в Азии, Африке и Латинской Америке отмечается рост. Учитывая глобальный характер распространения ртути, можно сказать, что снижение уровней ртути за счёт сокращения выбросов в одних регионах компенсируется ростом ртути за счёт роста выбросов в других регионах (межконтинентальный перенос). Однако это не изменило уровень фоновых концентраций ртути в воздухе, как в глобальном, так и в региональном масштабе, что говорит о решающей роли природных источников в его формировании.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы 4.5. «Развитие и модернизация методов и технологий комплексного фонового мониторинга и комплексной оценки состояния и загрязнения окружающей среды РФ и ее динамики (по интегрированным результатам сетей мониторинга Росгидромета)». Регистрационный номер 125031703848-8.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам за просмотр рукописи и сделанные ценные замечания, которые были приняты и учтены в тексте.

Список литературы

Бурцева, Л.В., Конькова, Е.С. (2016) Свинец и кадмий в атмосфере и осадках в фоновых районах восточно-европейского региона, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXVII, № 2, с. 59-70.

Бурцева, Л.В., Черханов, Ю.П., Голубева, Н.И. (1998) Ртуть в приземном воздухе Арктики, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 57- 64.

Бурцева, Л.В., Жердев, К.А., Алехина М.А. (2021) Массовые концентрации ртути, свинца и кадмия в атмосферном воздухе в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике в 2000-2005 гг., *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620925*.

Бурцева, Л.В. (2022) Массовые концентрации ртути, свинца и кадмия в атмосферном воздухе в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике в 2006-2010 гг., *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620925*.

Громов, С.А., Парамонов, С.Г. (2015) Современное состояние и перспективы развития комплексного фоновоего мониторинга загрязнения природной среды, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXVI, № 1, с. 205-221.

Калинчук, В.В. (2015) Особенности пространственно-временного распределения атомарной ртути в приземном слое атмосферы над дальневосточными морями России (по результатам исследований за 2010-2013 гг.), *Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты*, Труды Международного симпозиума, Новосибирск, 2015 г., с 173-177.

Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (1979) URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/transboundary.shtml.

Конюхова, И. (2017) *Глобальное соглашение по ртути – конвенция Минамата*, 20 с., URL: <https://mineconom.gov.kg/froala/uploads/file/cd4a24aec4dfbe-3350597b24b1e97d4d403a6059.pdf>.

Машьянов, Н.Р., Погарев, С.Е., Шолупов, С.Е., Рыжов, В.В., Обошкин, В.А., Ходжер, Т.В., Потемкин, В.Л., Моложникова, Е.В., Калинчук, В.В (2022) Мониторинг Атмосферной Ртути в Районе Озера Байкал (2011-2021), *Сборник докладов третьего международного симпозиума «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты»*, с. 126-129, URL: <http://www.limnolfwbiol.com/index.php/LFWB/article/view/955>.

Панкратов, Ф.Ф., Конаплёв, А.В., Махура, А., Кац, О.В. (2013) Анализ данных долговременного мониторинга концентраций атмосферной ртути и метеорологических величин на полярной станции Амдерма, *Метеорология и гидрология*, № 13, с. 56-67.

Петрухин, В.А., Андрианова, Г.А., Бурцева, Л.В., Виженский, В.А., Лапенко, Л.А., Юшкан, Е.И. (1986) Фоновое содержание свинца, ртути, мышьяка,

кадмия, в природных средах (по мировым данным), сообщение 3, *Мониторинг фонового загрязнения природных сред*, вып. 3, Л., Гидрометеиздат, с. 3-27.

Программа мониторинга и оценки Арктики (1991) URL: <https://www.amap.no/>.

РД 52.44.591-2015 (2015) *Массовая концентрация ртути в атмосферном воздухе. Методика измерения методом атомно-абсорбционной спектроскопии «холодного пара»*, ООО «Принт – 2», г. Ижевск.

Янин, Е.П. (2004а) Эмиссия ртути в окружающую среду при производстве цемента в России, *Экологическая экспертиза*, № 4, с. 31-42.

Янин, Е.П. (2004б) Эмиссия ртути в атмосферу российскими предприятиями черной металлургии, *Экологическая экспертиза*, № 5, с. 101-108.

Штайнер, А. (2013) *Глобальная оценка ртути 2013. Источники, эмиссии, реализации и транспорт в окружающей среде*, Доклад ЮНЕП в Найроби 2013 г., URL: <https://nparso.ru/index.php/informatsiya/nashi-publikatsii/34-yunep-podgotovila-obnovlenie-globalnoj-otsenki-rtuti-global-mercury-assessment-2013-sources-emissions-releases-and-environmental-transport>.

Aas, W., Bohlin-Nizzetto, P. (2014) *Heavy metals and POP measurements, 2012*, EMEP/CCC, 04/2015, Kjeller, NILU.

Aas, W., Bohlin-Nizzetto, P. (2017) *Heavy metals and POP measurements, 2015*, EMEP/CCC, 03/2017, Kjeller, NILU.

Aas, W., Breivik, K. (2013) *Heavy metals and POP measurements, 2011*, EMEP/CCC, 04/2013, Kjeller, NILU.

Aas, W., Nizzetto, P.B. (2015) *Heavy metals and POP measurements, 2013*, EMEP/CCC, 04/2015, Kjeller, NILU.

Aas, W., Pfaffhuber, K.A., Bohlin-Nizzetto, P. (2016) *Heavy metals and POP measurements, 2014*, EMEP/CCC, 04/2016, Kjeller, NILU.

Brosset, C. (1987) The behavior of mercury in the physical environment, *Water, air and soil pollution*, vol. 34, pp. 145-166.

EMEP Manual for Sampling and Chemical Analysis (2001) EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001, Norway, NILU, 301 p.

Gonzalez-Raymat, H., Liu, G., Liriano, C., Li, Ya., Yin, Yo., Shi, Yi., Jiang, G., Cai, Yo (2017) Elemental mercury: Its unique properties affect its behavior and fate in the environment, *Environmental Pollution*, vol. 229, pp. 69-86, doi: 10.1016/j.envpol.2017.04.101.

GMA-2018 (2019) *Global mercury assessment 2018*, UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch, Geneva, Switzerland.

Heavy metal and POP transboundary pollution in 2015. Concentration and deposition maps, source-receptor matrices, ecosystem-specific deposition and evaluation of model performance" (2017) EMEP/MSC-E Supplementary material to EMEP Status Reports 2/2017 and 3/2017.

Leermakers, M., Menleman, C., Baeyens, W. (1996) Mercury Distribution and Fluxes in Lake Baikal, *Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances*, in Baeyens, W.W., Ebinghaus, R., Vasiliev, O. (eds.), Dordrecht, Boston, London, Kluwer Acad. Publishers, NATO ASI, ser. 2, vol. 21, pp. 303-315.

Lindberg, S., Bullock, R., Ebinghaus, R., Engstrom, D., Feng, X., Fitzgerald, W., Pirrone, N., Prestbo, E., Seigneur, C. (2007) A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition, *Ambio*, no. 36(1), pp. 19-32.

Lindqvist, O., Johanson, K., Aastrup, M., Anderson, A., Bringmark, T., Hovsenlus, G., Hakanson, L., Mtl, M., Timm, B. (1991) Mercury in the Swedish environment – research on causes consequences and corrective methods, *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 55, pp. 1-261.

Pacyna, J.M., Munch, J. (1991) Anthropogenic mercury emission in Europe, *Water, Air and Pollution*, vol. 56, pp. 51-61.

Pirrone, N., Cinnirella, S., Feng, X., Finkelman, R. B., Friedli, H. R., Leaner, J., Mason, R., Mukherjee, A.B., Stracher, G.B., Streets, D.G. (2010) Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 34(1), pp. 49-93, doi:10.5194/acpd-10-4719-2010, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-009-0004-9>.

Seigneur, C., Abeck, H., Reinhard, M. (1996) The effect of particulate absorption on mercury atmospheric chemistry, *Fourth International Conference on Mercury as a Global Pollutant. 1996*, Book of abstracts, Hamburg, p. 439.

References

Burtseva, L.V., Konkova, E.S. (2016) Svinets i kadmiy v atmosfere i osadkakh v fonovykh rayonakh vostochno-yevropeyskogo regiona [Lead and cadmium in the atmosphere and precipitation in background areas of the Eastern European region], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXVII, no. 2, pp. 59-70.

Burtseva, L.V., Cherkhanov, Yu.P., Golubeva, N.I. (1998) Rtut' v prizemnom vozdukh Arktiki [Mercury in the surface air of the Arctic], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 57-64.

Burtseva, L.V., Zherdev, K.A., Alekhina M.A. (2021) Mass concentrations of mercury, lead and cadmium in the atmospheric air in the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve in 2000-2005 [Massovyie kontsentratsii rtuti, svintsa i kadmiya v atmosfernom vozdukh v Prioksko-Terrasnom biosfernom zapovednike v 2000-2005 gg.], *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2022620925* [Certificate of state registration of the database No. 2022620925].

Burtseva, L.V. (2022) Massovyie kontsentratsii rtuti, svintsa i kadmiya v atmosfernom vozdukh v Prioksko-Terrasnom biosfernom zapovednike v 2006-

2010 гг. [Mass concentrations of mercury, lead and cadmium in the atmospheric air in the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve in 2006-2010], *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2022620925* [Certificate of state registration of the database No. 2022620925].

Gromov, S.A., Paramonov, S.G. (2015) *Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya kompleksnogo fonovogo monitoringa zagryazneniya prirodnoy sredy* [Current state and prospects for the development of integrated background monitoring of environmental pollution], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXVI, no. 1, pp. 205-221.

Kalinchuk, V.V. (2015) *Osobennosti prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya atomarnoy rtuti v privodnom sloye atmosfery nad dal'nevostochnymi moryami Rossii (po rezul'tatam issledovaniy za 2010-2013 gg.)* [Features of the spatio-temporal distribution of atomic mercury in the atmospheric surface layer over the Far Eastern seas of Russia (based on the results of studies for 2010-2013)], *Rtut' v biosfere: ekologo-geokhimicheskiye aspekty, Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma, Novosibirsk, 2015 g.* [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects, Proceedings of the International Symposium, Novosibirsk, 2015], Novosibirsk, Russia, pp. 173-177.

Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (1979) URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/transboundary.shtml.

Konyukhova, I. (2017) *Global'noye soglasheniye po rtuti – konventsia Minamata* [Global Agreement on Mercury – Minamata Convention], 20 p., URL: <https://mineconom.gov.kg/froala/uploads/file/cd4a24aec4dfbe3350597b24b1e97d4d403a6059.pdf>.

Mashyanov, N.R., Pogarev, S.E., Sholupov, S.E., Ryzhov, V.V., Obolkin, V.A., Khodzher, T.V., Potemkin, V.L., Molozhnikova, E.V., Kalinchuk, V.V (2022) *Monitoring Atmosfernoy Rtuti v Rayone Oзера Baykal (2011-2021)* [Monitoring of Atmospheric Mercury in the Lake Baikal Region (2011-2021)], *Sbornik dokladov tret'yego mezhdunarodnogo simpoziuma «Rtut' v biosfere: ekologo-geokhimicheskiye aspekty»* [Proceedings of the Third International Symposium "Mercury in the Biosphere: Ecological and Geochemical Aspects"], pp. 126-129, URL: <http://www.limnolwbiol.com/index.php/LFWB/article/view/955>.

Pankratov, F.F., Konaplev, A.V., Makhura, A., Katz, O.V. (2013) *Analiz dannykh dolgovremennogo monitoringa kontsentratsiy atmosfernoy rtuti i meteorologicheskikh velichin na polyarnoy stantsii Amderma* [Analysis of long-term monitoring data of atmospheric mercury concentrations and meteorological variables at the Amderma polar station], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 13, pp. 56-67.

Petrukhin, V.A., Andrianova, G.A., Burtseva, L.V., Vizhensky, V.A., Lapenko, L.A., Yushkan, E.I. (1986) *Fonovoye sodержaniye svintsa, rtuti, mysh'yaka, kadmiya, v prirodnnykh sredakh (po mirovym dannym), coobshcheniye 3* [Background content of lead, mercury, arsenic, cadmium in natural environments (according to world data), message 3], *Monitoring fonovogo zagryazneniya*

prirodnykh sred [Monitoring of background pollution of natural environments], issue 3, Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia pp. 3-27.

Программа мониторинга и оценки Арктики (1991) URL: <https://www.amap.no/>.

RD 52.44.591-2015 (2015) *Massovaya kontsentratsiya rtuti v atmosfernom vozduke. Metodika izmereniya metodom atomno-absorbtsionnoy spektrometrii «kholodnogo para»* [Mass concentration of mercury in atmospheric air. Methodology for measuring by the method of atomic absorption spectrometry of "cold steam"], Print-2 LLC, Izhevsk, Russia.

Yanin, E.P. (2004a) Emissiya rtuti v okruzhayushchuyu sredu pri proizvodstve tsementa v Rossii [Mercury emissions into the environment during cement production in Russia], *Ekologicheskaya ekspertiza*, no. 4, pp. 31-42.

Yanin, E.P. (2004b) Emissiya rtuti v atmosferu rossiyskimi predpriyatiyami chernoy metallurgii [Mercury emissions into the atmosphere by Russian ferrous metallurgy enterprises], *Ekologicheskaya ekspertiza*, no. 5, pp. 101-108.

Steiner, A. (2013) *Global'naya otsenka rtuti 2013: Istochniki, emissii, realizatsii i transport v okruzhayushchey srede* [Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport], Doklad YUNEP v Nayrobi 2013 g [UNEP Nairobi Report 2013], URL: <https://nparso.ru/index.php/informatsiya/nashi-publikatsii/34-yunep-podgotovila-obnovlenie-globalnoj-otsenki-rtuti-global-mercury-assessment-2013-sources-emissions-releases-and-environmental-transport>.

Aas, W., Bohlin-Nizzetto, P. (2014) *Heavy metals and POP measurements, 2012*, EMEP/CCC, 04/2015, Kjeller, NILU.

Aas, W., Bohlin-Nizzetto, P. (2017) *Heavy metals and POP measurements, 2015*, EMEP/CCC, 03/2017, Kjeller, NILU.

Aas, W., Breivik, K. (2013) *Heavy metals and POP measurements, 2011*, EMEP/CCC, 04/2013, Kjeller, NILU.

Aas, W., Nizzetto, P.B. (2015) *Heavy metals and POP measurements, 2013*, EMEP/CCC, 04/2015, Kjeller, NILU.

Aas, W., Pfaffhuber, K.A., Bohlin-Nizzetto, P. (2016) *Heavy metals and POP measurements, 2014*, EMEP/CCC, 04/2016, Kjeller, NILU.

Brosset, C. (1987) The behavior of mercury in the physical environment, *Water, air and soil pollution*, vol. 34, pp. 145-166.

EMEP Manual for Sampling and Chemical Analysis (2001) EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001, Norway, NILU, 301 p.

Gonzalez-Raymat, H., Liu, G., Liriano, C., Li, Ya., Yin, Yo., Shi, Yi., Jiang, G., Cai, Yo (2017) Elemental mercury. Its unique properties affect its behavior and fate in the environment, *Environmental Pollution*, vol. 229, pp. 69-86, doi: 10.1016/j.envpol.2017.04.101.

GMA-2018 (2019) *Global mercury assessment 2018*, UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch, Geneva, Switzerland.

Heavy metal and POP transboundary pollution in 2015: Concentration and deposition maps, source-receptor matrices, ecosystem-specific deposition and evaluation of model performance" (2017) EMEP/MSC-E Supplementary material to EMEP Status Reports 2/2017 and 3/2017.

Leermakers, M., Menleman, C., Baeyens, W. (1996) Mercury Distribution and Fluxes in Lake Baikal, *Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances*, in Baeyens, W.W., Ebinghaus, R., Vasiliev, O. (eds.), Dordrecht, Boston, London, Kluwer Acad. Publishers, NATO ASI, ser. 2, vol. 21, pp. 303-315.

Lindberg, S., Bullock, R., Ebinghaus, R., Engstrom, D., Feng, X., Fitzgerald, W., Pirrone, N., Prestbo, E., Seigneur, C. (2007) A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition, *Ambio*, no. 36(1), pp. 19-32.

Lindqvist, O., Johanson, K., Aastrup, M., Anderson, A., Bringmark, T., Hovsenlus, G., Hakanson, L., Mtil, M., Timm, B. (1991) Mercury in the Swedish environment – research on causes consequences and corrective methods, *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 55, pp. 1-261.

Pacyna, J.M., Munch, J. (1991) Anthropogenic mercury emission in Europe, *Water, Air and Pollution*, vol. 56, pp. 51-61.

Pirrone, N., Cinnirella, S., Feng, X., Finkelman, R. B., Friedli, H. R., Leaner, J., Mason, R., Mukherjee, A.B., Stracher, G.B., Streets, D.G. (2010) Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 34(1), pp. 49-93, doi:10.5194/acpd-10-4719-2010, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-009-0004-9>.

Seigneur, C., Abeck, H., Reinhard, M. (1996) The effect of particulate absorption on mercury atmospheric chemistry, *Fourth International Conference on Mercury as a Global Pollutant. 1996*, Book of abstracts, Hamburg, p. 439.

Статья поступила в редакцию (Received): 25.03.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 25.06.2025.

Для цитирования / For citation:

Бурцева, Л.В., Александрова, М.С., Позднякова, Е.А., Брускина, И.М. (2025) Ртуть в атмосферном воздухе в фоновых районах стран Северной, Центральной и Восточной Европы, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVI, № 3-4, с. 64-83, doi:10.24412/2782-3237-2025-3-4-64-83.

Burtseva, L.V., Aleksandrova, M.S., Pozdnyakova, E.A., Bruskina, I.M. (2025) Mercury in the atmospheric air in the background areas of the Nordic countries, Central and Eastern Europe, *Ecological monitoring and modeling of ecosystems*. v. XXXVI, no. 3-4, pp. 64-83, doi:10.24412/2782-3237-2025-3-4-64-83.

Атмосферные выбросы парниковых газов от транспортного сектора в России за 2010-2023 гг.

В.А. Грабар^{1)}, В.М. Лытов^{1,2)}*

¹⁾ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)»,
Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64

*Адрес для переписки: v774007@yandex.ru

Реферат. В статье представлены результаты количественной оценки эмиссии парниковых газов от внутреннего транспорта, а также от международных морских и воздушных перевозок с территории России за рубеж за период 2010-2023 гг. Динамика выбросов парниковых газов определялась, в основном, тенденциями развития экономики, торговли и показателями деятельности транспортного комплекса РФ. Ограничительные меры в связи с пандемией COVID-19 и введение антироссийских санкций также оказали влияние на величину выбросов. В 2023 г. выбросы парниковых газов от внутреннего транспорта увеличились на 40% по сравнению с 2010 г. и составили 218 млн. т CO₂-экв. На международные авиационные и морские перевозки приходилось 3% и 9% общего объема выбросов парниковых газов от транспортного сектора РФ, соответственно. В ближайшие годы можно ожидать увеличения выбросов парниковых газов от российского транспортного сектора в связи с повышением спроса на транспортные услуги. Введение антироссийских санкций способствует росту глобальной эмиссии диоксида углерода от перевозок за счёт изменения международной транспортной логистики, увеличения транспортных издержек и использования менее эффективных транспортных коридоров и маршрутов.

Ключевые слова. Парниковые газы, выбросы, расчёт, внутренний транспорт, международные перевозки, международные сравнения, драйверы.

The atmospheric greenhouse gas emissions from transport sector in Russia for the years 2010-2023

V.A. Grabar¹⁾, V.M. Lytov^{1,2)}

¹⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russian Federation

²⁾ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
64, Leningradskay avenue, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: v774007@yandex.ru

Abstract. The results of greenhouse gas emissions assessment from the transport sector in Russia for the period 2010-2023 are presented in the article. The dynamics of GHG emissions were mainly determined by the trends in economic and trade development, as well as key indicators of the Russian transport sector. COVID-19 pandemic restrictions and anti-Russian sanctions also had an impact on emission. In 2023, GHG emissions from domestic transport increased by 40% compared to 2010, reaching 218 million tons of CO₂ equivalent. International aviation and maritime transport accounted for 3% and 9% of the total GHG emissions from the Russian transport sector, respectively. In the coming years it can be expected an increase in GHG emissions from the Russian transport sector due to the growing demand for transportation services. Anti-Russian sanctions are contributing to the growth of global carbon dioxide emissions from transport due to changes in international transport logistics, increased transport costs and the use of less efficient transport corridors and routes.

Keywords. Greenhouse gases, emissions, calculation, domestic transport, international shipping and aviation, international comparisons, drivers.

Введение

С начала индустриальной эпохи глобальное потепление в мире превысило 1.2°C, при этом в каждом десятилетии температура была выше, чем в предыдущем. Согласно данным Шестого доклада об оценках Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) антропогенные выбросы парниковых газов (ПГ) в атмосферу оказывают решающее воздействие на климатические изменения (IPCC, 2023). Для России регулирование выбросов парниковых газов особенно актуально. По оценке Росгидромета, средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха в стране в 1976-2020 гг. составила 0.51°C за десятилетие, что в 2.8 раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период (Доклад, 2021).

Транспорт генерирует около 15% общемировых выбросов ПГ и около 23% глобальных выбросов диоксида углерода, связанных со сжиганием топлива в энергетическом секторе. При этом, на дорожные перевозки приходится три четверти (74.5%) транспортных выбросов, из которых большая часть поступает от легковых автомобилей и автобусов, на долю которых приходится 45.1%, оставшиеся 29.4% относятся к грузовым автомобильным перевозкам. Выбросы от авиации и судоходства составляют 11.6% и 10.6% соответственно. Железнодорожные перевозки вносят около 1% в суммарные выбросы от транспорта. На другие виды транспорта, главным образом трубопроводный, приходится оставшиеся 2.3% (IEA, 2020a; Jaramillo, Kahn Ribeiro et. al., 2022).

Необходимо отметить, что за последние 70 лет развитие транспорта в мире осуществлялось стремительными темпами. За этот период население Земли увеличилось в три раза, при этом объемы пассажирских перевозок выросли в 15 раз, товарные грузопотоки – в 20 раз, количество автомобилей выросло в 22 раза. Согласно базе данных выбросов EDGAR в период с 1990 по 2023 гг. глобальные выбросы ПГ увеличились на 62%, при этом рост

выбросов в транспортном секторе составил за этот период 78% со среднегодовым приростом в 2.4%. В результате пандемии COVID-19 выбросы парниковых газов в транспортном секторе резко сократились на 14% в 2020 году, однако начиная с 2021 года они возобновили рост, увеличиваясь в среднем на 4.5% в год. Очевидно, что этот процесс невозможно остановить, и в ближайшие десятилетия объемы пассажирских и грузовых перевозок будут только увеличиваться, что повлечет за собой рост выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов. Так, прогнозируется, что к 2050 году объем пассажирских перевозок в мире возрастет более чем в 2 раза, по сравнению с 2015 годом, а грузовых – почти в 3 раза.

Основополагающим международным договором, положившим начало глобальному сотрудничеству по вопросам изменения климата, стала Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН), принятая в 1992 г. В 1997 г. количественные обязательства стран по ограничению или сокращению выбросов ПГ были закреплены в Киотском протоколе к РКИК ООН (Киотский протокол, 1997). При этом согласно статье 2.2 Киотского протокола, вопросами, связанными с выбросами ПГ при международных авиационных и морских перевозках, занимаются такие специализированные учреждения ООН как Международная организация гражданской авиации (ИКАО) и Международная морская организация (ИМО). В 2015 г. на смену Киотскому протоколу пришло Парижское соглашение по климату, суть которого заключается в удержании прироста глобальной средней температуры к концу XXI века намного ниже 2°C сверх доиндустриальных показателей и приложении усилий для ограничения роста температуры до 1.5°C. Инструментом реализации Парижского соглашения являются определяемые на национальном уровне вклады по сокращению выбросов ПГ (ОНУВ), которые каждая страна самостоятельно разрабатывает и реализовывает. Каждые 5 лет страны должны корректировать свои вклады в сторону ужесточения природоохранных мер и представлять их в секретариат РКИК ООН (Парижское соглашение, 2015). В настоящее время более 130 стран разработали и официально приняли стратегии декарбонизации экономики и утвердили цели по достижению углеродной нейтральности, в том числе США, Великобритания, Европейский союз, Япония, Южная Корея – до 2050 г., Казахстан, Китай – до 2060 г., Индия – до 2070 г. Главным определяющим документом декарбонизации российской экономики является Стратегия социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г., принятая в 2021 году. При целевом сценарии планируется сокращение нетто-выбросов парниковых газов на 60% от уровня 2019 и на 80% к 2050 от уровня 1990 года и последующее достижение углеродной нейтральности к 2060 году (Стратегия социально-экономического развития, 2021).

Для отслеживания выполнения принятых мировым сообществом целевых показателей важное значение приобретают мониторинг и уточнение количественных оценок выбросов ПГ. Надежная и точная инвентаризация выбросов ПГ позволяет эффективно проводить политику углеродного регулирования и способствует предотвращению изменения климата.

Целью данной статьи является количественная оценка выбросов основных ПГ (диоксида углерода, метана, оксида диазота) от дорожного транспорта, авиации, водного и железнодорожного транспорта при осуществлении внутренних перевозок, а также от международных воздушных и морских перевозок с территории России за рубеж с 2010 по 2023 гг., описание методических подходов и предложения к их усовершенствованию, анализ динамики и основных драйверов изменения выбросов, сравнение полученных результатов с международными показателями. Научная новизна работы заключается в использовании при расчётах национальных коэффициентов выбросов диоксида углерода от сжигания жидких видов топлив, что способствует более точному учёту выбросов парниковых газов.

Методы и материалы

При сжигании нефтепродуктов в двигателях внутреннего сгорания транспортных средств в атмосферу поступают диоксид углерода (CO_2), пары воды (H_2O), метан (CH_4), оксид диазота (N_2O), оксид углерода (CO), неметановые летучие органические соединения (C_nH_m), окислы азота (NO_x) и серы (SO_x), аэрозоли, зольные соединения и др. (IPCC, 2006).

Расчеты выбросов ПГ от транспортного сектора в России были выполнены в соответствии с методологией МГЭИК (IPCC, 2006). Полученные оценки выбросов ПГ включены в ежегодно представляемый Российской Федерацией в органы РКИК ООН национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом.

Необходимо отметить, что оценка выбросов CO_2 лучше всего рассчитывается на основе количества и типа сгораемого топлива и содержания углерода в нем. При этом, содержание углерода в топливе является физико-химической характеристикой, присущей каждому конкретному виду топлива и не зависит от процесса или условий сжигания топлива. Если категория выбросов является ключевой, то странам рекомендуется разработать национальные коэффициенты эмиссии CO_2 на основе исследования компонентного состава используемых топлив в стране. Оценка выбросов других газов с парниковым эффектом (CH_4 и N_2O) более сложна, так как коэффициенты выбросов зависят от конструктивных особенностей транспортного средства, вида топлива, эксплуатационных характеристик транспортного средства, типа технологии контроля за выхлопными газами и др. В зависимости от доступности и полноты исходных данных расчет выбросов ПГ возможен по нескольким уровням сложности (уровень 1, 2 и 3). Чем больше информации о типе транспортного средства, режиме его работы и особенностях эксплуатации, тем выше может быть уровень расчета и точнее результат. Коэффициенты по умолчанию, указанные в Руководящих принципах МГЭИК, используются для расчетов по уровню 1 (IPCC, 2006).

Для пересчета выбросов CH_4 и N_2O в CO_2 -экв. были использованы потенциалы глобального потепления из Пятого Оценочного доклада МГЭИК, равные, соответственно, 28 и 265 (МГЭИК, 2013).

Подходы к оценке выбросов ПГ от воздушного, водного и железнодорожного транспорта в РФ

В категорию «Транспорт» включены только выбросы при сжигании моторного топлива, используемого в качестве источника энергии для двигателей внутреннего сгорания различных видов транспорта. Выбросы ПГ от воздушного, водного и железнодорожного транспорта рассчитывались на основе данных о массе израсходованного топлива и соответствующих конверсионных коэффициентов и коэффициентов эмиссии по формуле 1 (IPCC, 2006):

$$E_i = \sum_m FC_m \cdot CF_{TCEm} \cdot CF_{NCV} \cdot EF_{im} \quad (1)$$

где:

E_i – величина эмиссии парникового газа i , т;

FC_m – масса израсходованного топлива вида m , т;

CF_{TCEm} – коэффициент пересчета в тонны условного топлива в угольном эквиваленте по виду топлива m , т у.т. · т⁻¹;

CF_{NCV} – коэффициент пересчета в теплотворную способность, ТДж т у.т.⁻¹;

EF_{im} – коэффициент эмиссии парникового газа i для топлива вида m , т·ТДж⁻¹,

m – вид топлива (например, бензин, авиационный керосин, дизтопливо, природный газ и т.д.).

Оценка потребления топлива воздушным транспортом производилась расчетным путем по данным о налете самолето-часов Росавиации, а также удельных показателях расхода топлива по типам воздушных судов, предоставленных ФГУП Государственный научно-исследовательский институт Гражданской Авиации (далее – ГосНИИ ГА). Данные по потреблению топлива внутренним водным и железнодорожным транспортом были получены из Топливо-энергетического баланса РФ (далее – ТЭБ). Методика расчета выбросов парниковых газов от водного транспорта и авиации подробно описана в работах (Грабар и др., 2009; Грабар и др., 2011; Грабар и др., 2015; Дмитриева, Грабар, 2017).

В расчетах были использованы национальные коэффициенты выбросов CO_2 от сжигания жидких топлив, полученные в рамках Важнейшего инновационного проекта государственного значения в результате исследования компонентного состава выбранных видов жидких топлив¹⁾. На основе экспериментальных и расчетных данных был проведен анализ компонентного состава основных видов жидких топлив (Ершов и др., 2024; Зеленова и др., 2024). В рамках работы была разработана расчетная модель, использующая в качестве основного источника данных ежегодные статистические сборники Центрального диспетчерского управления топливно-энергетического ком-

плекса, позволяющая оценить содержание углерода, теплоту сгорания и коэффициенты выбросов CO₂ различных топлив, производимых в Российской Федерации в период с 2010 по 2023 гг. Для некоторых видов топлив, которые не вошли в состав исследования, использовались коэффициенты выбросов по умолчанию, указанные в методике МГЭИК. Коэффициенты выбросов CO₂, использованные в расчётах, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты выбросов CO₂ от сжигания отдельных видов жидких топлив, кг CO₂/ТДж

Table 1. National CO₂ emission factors from the combustion of certain types of liquid fuels, kg CO₂/TJ

Год	Автомобильный бензин (н)*	Авиационный керосин (н)	Дизельное топливо (н)	Мазут топочный (н)	Сжиженный углеводородный газ	Сжатый компримированный газ (н)	Другие моторные топлива
2010	72320	73098	74374	77750	63100	54400	71900
2011	72156	73096	74393	77744	63100	54400	71900
2012	72198	73081	74369	77737	63100	54400	71900
2013	72163	73066	74375	77701	63100	54400	71900
2014	72020	73064	74358	77696	63100	54400	71900
2015	72047	73056	74340	77696	63100	54400	71900
2016	71939	73051	74359	77693	63100	54400	71900
2017	71998	73060	74343	77679	63100	54400	71900
2018	71962	73070	74330	77572	63100	54400	71900
2019	72070	73058	74327	77647	63100	54400	71900
2020	72002	73061	74329	77660	63100	54400	71900
2021	72007	73048	74317	77644	63100	54400	71900
2022	72100	73070	74307	77810	63100	54400	71900
2023	72087	73061	74322	77806	63100	54400	71900

***Примечание:** (н) – национальный коэффициент выбросов CO₂ от сжигания топлив

Для расчета выбросов CH₄ и N₂O использовались рекомендуемые МГЭИК коэффициенты эмиссии по умолчанию, значения которых приведены в табл. 2.

¹⁾Работа проведена в рамках договора на выполнение научно-исследовательской работы по теме «Проведение исследования компонентного состава приоритетных видов жидкого топлива» специалистами ООО «Центр мониторинга новых технологий» (независимая исследовательская компания, специализирующаяся на разработке новых продуктов и технологий, инжиниринге, экспериментальных и информационно-аналитических исследованиях и консалтинге в нефтегазовом секторе, нефтехимии и энергетике.). Экспериментальное исследование образцов жидкого топлива выполнялось совместно с Институтом нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (ИНХС РАН).

Таблица 2. Коэффициенты эмиссии CH_4 и N_2O по видам транспорта (IPCC, 2006)

Table 2. CH_4 and N_2O emission factors by types of transport (IPCC, 2006)

Вид топлива	Коэффициент эмиссии CH_4 , $\text{т} \cdot \text{ТДж}^{-1}$	Коэффициент эмиссии N_2O , $\text{т} \cdot \text{ТДж}^{-1}$
Воздушный транспорт	0.0005	0.002
Ж/д транспорт	0.00415	0.0286
Водный транспорт	0.007	0.002

В настоящий время оценки выбросов ПГ для водного и железнодорожного транспорта основываются на обобщенных данных Топливно-энергетического баланса РФ о потреблении энергетических ресурсов и соответствуют уровню 1 методики МГЭИК. Полученные оценки выбросов можно считать оценками «сверху-вниз», т.е. без подробной детализации, например, по типам судов или локомотивов и т. д. В то же время, от точности расчетных оценок зависит эффективность организационных решений, направленных на снижение негативных эффектов на климат, поэтому совершенствование методик расчета является актуальной задачей. Статистическая информация, используемая для расчетов по уровню 1 не всегда бывает полной и достоверной. Для повышения точности оценок и перехода на более высокие уровни расчетов необходимо использовать детализированные данные по отдельным типам и моделям транспортных средств, интенсивности их использования, условиям эксплуатации, технологиям сжигания и нейтрализации выбросов на уровне отдельных эмитентов, что требует проведения отдельных научных исследований.

Использование более высоких уровней расчета поможет сократить неопределенности оценок выбросов, что позволит более эффективно формировать государственную климатическую политику, планировать и оценивать результаты мер по борьбе с изменением климата. Подробнее про оценку неопределенности выбросов для железнодорожного, водного и др. видов транспорта написано в (НДК, 2025).

Подходы к оценке выбросов ПГ от дорожного транспорта

Расчет выбросов ПГ от дорожного транспорта проводился с использованием инструментальных методов оценки (уровень 3 МГЭИК) на основе компьютерной модели/программы COPERT. Эмиссии ПГ от автомобилей в программе COPERT рассчитываются с учетом численности парка АТС разных типов, структуры парка по экологическому классу, среднегодовых пробегов, средней скорости движения, объема двигателя, вида топлива. Ранее, значительное количество входных показателей принималось по умолчанию или с использованием определенных допущений. Некоторые категории транспортных средств в принципе не учитывались в модели, например, автомобили, использующие сжиженный углеводородный (нефтяной) газ (далее – СУГ) и компримированный природный газ (далее – КПП) в качестве моторного топлива.

В 2023-2024 гг. в рамках проекта ВИП ГЗ профильными экспертами транспортного комплекса была разработана методика усовершенствования расчетного мониторинга (инструментального) выбросов ПГ от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта Российской Федерации, а также проведен вероятностно-статистический анализ точности и неопределенности значений итоговых выбросов. Основные принципы и критерии данной методики были заложены при разработке программного продукта «Транспортная модель», которая позволяет проводить оценку выбросов ПГ на всем требуемом временном интервале, а также продлять временной период для дальнейшей инвентаризации.

Разработанная «Транспортная модель» формирует единую систему сбора и обработки исходной информации о функционировании автомобильного парка в детализации, необходимой для достоверной оценки выбросов ПГ от автомобильного и внедорожного транспорта. При инвентаризации выбросов проводится двухсторонняя проверка модельных (расчетных) оценок топливопотребления с данными ТЭБа. Приоритет отдаётся данным ТЭБа, и только в тех случаях, когда в ТЭБ наблюдаются подозрительные (аномальные) значения, они корректируются. Более подробно методика усовершенствования расчетного мониторинга выбросов от автомобильного и внедорожного транспорта описана в работах (Trofimenko et al., 2023; Лытов и др., 2024; Трофименко и др., 2025). Данная методика позволяет получать непротиворечивые и согласованные оценки объемов выбросов ПГ и газов-прекурсоров от автотранспорта и внедорожных мобильных машин.

Для включения категории «внедорожный транспорт» в Национальный кадастр необходимо добиться согласованной оценки потребления топлив автотранспортом, внедорожным транспортом и категориями стационарного сжигания во всем временном периоде (1990-2023 гг.). Внедрение данной категории ожидается в последующие годы.

По результатам выполненной работы, средние удельные национальные коэффициенты выбросов CH_4 и N_2O для различных категорий транспортных средств в период с 2010-2023 гг., представлены в табл. 3 и 4.

В настоящее время в расчетах используются удельные параметры расхода топлива (энергии) транспортных средств согласно программе COPERT, т. е. для автомобилей, эксплуатируемых в парке Европейского Союза. Дальнейшее развитие методологических подходов для оценок выбросов ПГ от дорожного транспорта должно быть направлено на повышение полноты охвата и достоверности исходных статистических данных о парке транспортных средств, непосредственно используемом в РФ.

Таблица 3. Средние удельные коэффициенты выбросов CH_4 по категориям транспортных средств²⁾, кг $\text{CH}_4/\text{ТДж}$

Table 3. Average specific CH_4 emission factors by vehicle category, kg CH_4/TJ

Год/ Категория*	Легк. авто. – бенз.	Легк. авто. – диз. топл.	Легк. авто. – СУГ	Легк. авто. – КПГ	Легк. груз. авто. – бенз.	Легк. груз. авто. – диз. топл.	Тяж. груз. авто. и автобусы – бенз.	Тяж. груз. авто. и автобусы – диз. топл.	Тяж. груз. авто. и автобусы – КПГ	Мото- циклы – бенз.
2010	18.54	1.30	14.09	13.60	18.60	1.25	17.03	7.51	70.12	116.93
2011	17.43	1.11	13.84	13.60	17.77	1.06	17.03	7.16	69.26	114.73
2012	16.33	0.91	13.55	13.60	16.94	0.86	17.02	6.80	67.74	112.54
2013	15.22	0.72	13.31	13.60	16.10	0.67	17.02	6.45	70.80	110.34
2014	14.36	0.61	13.08	13.60	15.31	0.58	17.02	5.98	72.77	106.48
2015	13.84	0.54	12.93	13.60	14.39	0.51	17.01	5.77	73.43	101.99
2016	13.48	0.50	12.84	13.60	13.82	0.46	17.01	5.51	73.99	99.65
2017	12.82	0.42	12.71	13.60	13.60	0.44	16.99	5.02	74.30	98.64
2018	12.15	0.37	12.54	13.60	12.73	0.40	16.97	4.58	74.61	97.14
2019	11.81	0.35	12.39	13.60	12.29	0.39	16.95	4.40	75.21	94.68
2020	11.29	0.32	12.26	13.60	11.63	0.36	16.91	4.17	75.17	92.62
2021	10.76	0.29	12.16	13.60	10.90	0.32	16.85	3.88	75.16	89.88
2022	10.50	0.28	12.10	13.60	10.44	0.28	16.80	3.71	75.19	85.96
2023	10.35	0.27	12.06	13.60	10.34	0.30	16.80	3.57	75.54	83.36

Таблица 4. Средние удельные коэффициенты выбросов N_2O по категориям транспортных средств²⁾, кг $\text{N}_2\text{O}/\text{ТДж}$

Table 4. Average specific N_2O emission factors by vehicle category, kg $\text{N}_2\text{O}/\text{TJ}$

Год/ Категория*	Легк. авто. – бенз.	Легк. авто. – диз. топл.	Легк. авто. – СУГ	Легк. авто. – КПГ	Легк. груз. авто. – бенз.	Легк. груз. авто. – диз. топл.	Тяж. груз. авто. и автобусы – бенз.	Тяж. груз. авто. и автобусы – диз. топл.	Тяж. груз. авто. и автобусы – КПГ	Мото- циклы – бенз.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2010	1.71	2.28	1.86	0.69	3.22	1.80	0.92	1.79	4,78	1,32
2011	1.61	2.37	1.82	0.67	3.17	1.91	0.92	1.79	4,89	1,32
2012	1.51	2.47	1.78	0.65	3.13	2.02	0.92	1.79	5.24	1.33
2013	1.41	2.56	1.74	0.64	3.08	2.13	0.92	1.79	6.31	1.33
2014	1.33	2.62	1.71	0.63	2.99	2.19	0.92	1.83	6.96	1.35
2015	1.29	2.64	1.69	0.62	2.97	2.23	0.92	1.84	7.19	1.36

²⁾Категории транспортных средств соотносятся с категориями, указанными в техническом регламенте таможенного союза о безопасности колесных транспортных средств по следующему принципу: Легковые автомобили – категория М1; Легковые грузовые автомобили – категория N1; Тяжелые грузовые автомобили и автобусы - категории N2, N3, M2, M3; Мотоциклы - L-категория.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2016	1.25	2.65	1.64	0.61	2.85	2.25	0.92	1.86	7.36	1.37
2017	1.17	2.69	1.60	0.60	2.75	2.27	0.92	2.00	7.44	1.37
2018	1.08	2.71	1.48	0.58	2.71	2.29	0.92	2.13	7.54	1.37
2019	1.06	2.72	1.50	0.56	2.96	2.29	0.92	2.18	7.58	1.37
2020	1.01	2.72	1.48	0.54	2.95	2.30	0.92	2.25	7.61	1.38
2021	0.96	2.70	1.44	0.53	2.73	2.32	0.91	2.35	7.63	1.39
2022	0.94	2.70	1.42	0.53	2.65	2.34	0.91	2.38	7.67	1.40
2023	0.92	2.68	1.41	0.53	2.56	2.33	0.91	2.47	7.68	1.40

Подходы к оценке выбросов от международных воздушных и морских перевозок.

Согласно методологии МГЭИК, выбросы от международного водного и воздушного транспорта охватывают все рейсы, выполняемые с территории Российской Федерации за рубеж, независимо от национальной принадлежности морского/воздушного судна. При этом, выбросы ПГ от рейсов из зарубежных стран в РФ не учитываются. Согласно терминологии МГЭИК, топливо, которое используется морскими и воздушными судами для осуществления международных перевозок, называется бункерным (IPCC, 2006).

Подходы к оценке выбросов ПГ от бункерного топлива аналогичны подходам для оценки выбросов при осуществлении внутренних перевозок. Расчет выбросов ПГ от авиационного и морского бункерного топлива выполнялся по формуле 1 (IPCC, 2006).

Для оценки потребления топлива при осуществлении международных перелетов с территории России за рубеж были использованы данные о налёте воздушных судов Росавиации и данные по среднему часовому расходу топлива ГосНИИ ГА.

Расчет выбросов ПГ от морского бункерного топлива выполнялся на основе данных Информационно-аналитического агентства «ПортНьюс» (ИАА «ПортНьюс») о массе топлива, заправленного российскими и иностранными судами в портах РФ для осуществления международных морских и речных перевозок. В своих оценках ИАА «ПортНьюс» основывается на данных Федеральной таможенной службы России, администраций морских портов, ФГУП «Росморпорт», российских судоходных и бункеровочных компаний.

В расчетах были использованы национальные коэффициенты выбросов CO₂ (табл. 1) и коэффициенты CH₄ и N₂O по умолчанию МГЭИК (табл. 2) для авиационного керосина, мазута и дизельного топлива.

Результаты и обсуждение

Выбросы парниковых газов от воздушного, водного и железнодорожного транспорта во внутреннем сообщении

На рис. 1 представлена динамика выбросов ПГ от воздушного, водного и ж/д транспорта в России во внутреннем сообщении.

Как показали выполненные расчеты, с 2010 по 2019 гг. наблюдался восходящий тренд эмиссии ПГ от внутренней авиации. В 2020 г. выбросы ПГ сократились на 10% относительно уровня 2019 г. на фоне пандемии коронавируса, однако в 2021 и 2022 гг., по мере восстановления внутренних авиаперевозок, они снова начали расти. В 2021 году объём пассажиропотока на внутренних линиях не только полностью восстановился до уровня допандемийного 2019 года, но и превысил его. По данным Минтранса в 2021 году на внутренних воздушных линиях было перевезено более 87.5 млн пассажиров, что почти на 56% больше, чем в 2020 году, и на 20% превышает показатель 2019 года. В 2023 г. выбросы парниковых газов снизились и составили 14.7 млн. т CO₂-экв. Снижение выбросов в 2023 г. связано с уменьшением налета во внутреннем сообщении на 9.4% относительно 2022 г.

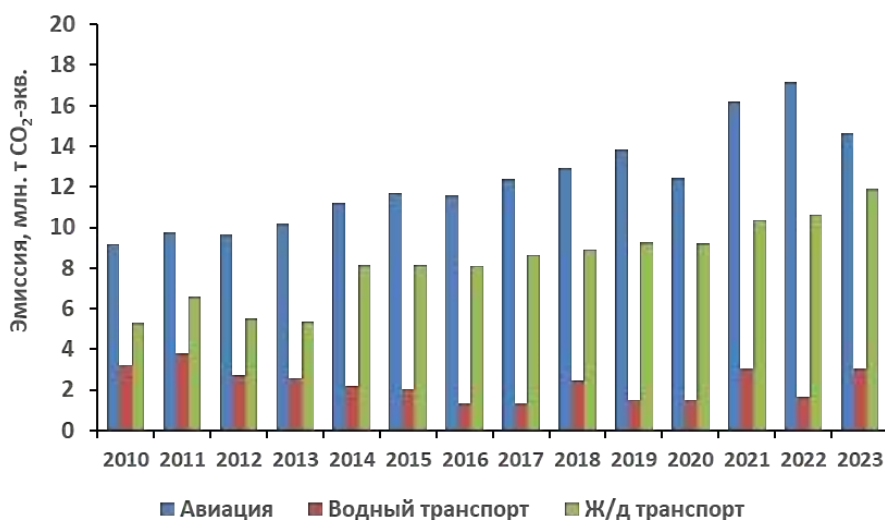


Рисунок 1. Динамика выбросов парниковых газов от воздушного, водного и ж/д транспорта во внутреннем сообщении

Figure 1. Dynamics of greenhouse gas emission from aviation, navigation and railway transport in domestic traffic

Расчеты показывают неравномерную динамику выбросов ПГ от водного транспорта по годам: снижение эмиссии на протяжении 2011-2017 гг., чередование периодов спада и роста выбросов с 2018 по 2023 гг. Изменение выбросов ПГ от водного транспорта связано с интенсивностью движения судов. В 2023 г. совокупная эмиссия CO₂, CH₄, N₂O от водного транспорта в России составила 3.1 млн. т CO₂-экв.

Железнодорожный транспорт является самым экологичным видом транспорта в пересчете на единицу выполняемой работы. Выбросы ПГ от железнодорожного транспорта связаны с эксплуатацией дизельных локомотивов от всех пассажирских и грузовых перевозчиков в стране. В целом за рассматриваемый период наблюдался рост выбросов ПГ с 5.3 млн. т CO_2 -экв. в 2010 г. до 9.3 млн. т CO_2 -экв. в 2019 г. В 2020-2021 гг. выбросы парниковых газов снизились в результате ограничений перевозок на фоне распространения пандемии коронавируса. В 2023 г. эмиссия CO_2 , CH_4 , N_2O от железнодорожного транспорта в России составила 11.9 млн. т CO_2 -экв. Необходимо отметить, что из всех видов транспорта железнодорожный транспорт пострадал меньше всего от санкционного режима в 2022-2023 гг., поскольку ОАО «Российские железные дороги» функционируют в пределах национальной территории, а используемая техника и технологии почти полностью отечественные.

Выбросы парниковых газов от дорожного транспорта

На рис. 2 представлена динамика выбросов CO_2 , CH_4 и N_2O от дорожного транспорта в период с 2010-2023 гг.

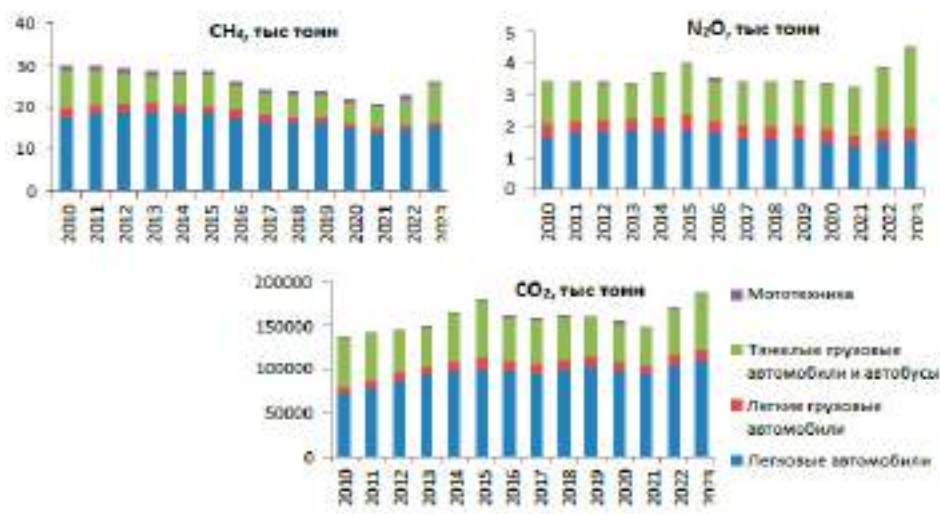


Рисунок 2. Динамика выбросов парниковых газов от дорожного транспорта с 2010-2023 гг., тыс. тонн

Figure 2. Dynamics of greenhouse gas emission from road transport from 2010 to 2023, kilotonnes

Как видно из рис. 2, выбросы CO_2 и N_2O показывают схожую динамику. В период с 2010-2015 гг. наблюдался рост выбросов ПГ. Начиная с 2016 года, ситуация стабилизировалась, произошло насыщение автопарка и выбросы начали постепенно снижаться до конца 2021 года. Так, в 2021 году выбросы составили 147.4 млн. тонн CO_2 и 3.27 млн тонн N_2O . Основными драйверами

сокращения выбросов послужило внедрение ряда высокоэффективных мер: запрет на продажу старых автомобилей низких экологических классов, введение стандартов топлива Евро 5 (ТР ТС 013/2011 и ГОСТ 32511-2013), повышение топливной эффективности автомобилей, введение утилизационного сбора, расширение использования природного газа в качестве моторного топлива, постепенное внедрение в автопарк гибридов и электротранспортных средств.

Эпидемия Covid-19 явилась основным фактором снижения выбросов ПГ от дорожного транспорта в 2020 г. В течение 2020 г. наблюдался спад производства и потребления нефтепродуктов. В 2021 г. потребление нефтепродуктов стало восстанавливаться до предыдущих уровней, однако в 2022 и 2023 гг. случился резкий рост потребления дизельного топлива, что сказалось на росте выбросов ПГ. В 2023 году выбросы CO_2 и N_2O увеличились на 26.7% и 37.6% относительно уровня 2021 г., достигнув 186.8 млн. тонн и 4.5 млн тонн, соответственно. За период с 2010 по 2023 г. увеличение выбросов CO_2 и N_2O от дорожного транспорта составило 36.8% и 31.3% соответственно.

Согласно рис. 2, с 2010-2021 гг. выбросы CH_4 стабильно снижались, однако после 2022 г. наблюдался их рост в связи с увеличением общего объема потребления топлива, особенно дизельного. В целом, за последние 10 лет, потребление дизельного топлива росло несколько большими темпами, чем автомобильного бензина. В 2023 г. выбросы CH_4 увеличились на 26.5% относительно уровня 2021 года и составили 26.3 млн тонн. За период с 2010-2023 гг. выбросы CH_4 сократились на 12.3%.

Выбросы ПГ от дорожного транспорта напрямую связаны с марочным составом, численностью, структурой автомобильного парка по типу, экологическому классу, возрасту транспортных средств, виду используемого топлива, среднегодовым пробегам и т. д. Глобально, уровень мобильности (населения), транспортной доступности и модернизации транспортной системы отражает текущую ситуацию, связанную с выбросами парниковых газов от автомобильного транспорта.

Суммарные выбросы парниковых газов от внутреннего транспорта в России

На рис. 3 представлены суммарные выбросы ПГ от внутреннего транспорта в России.

Как видно из рис. 3, с 2010 по 2015 гг. выбросы ПГ от внутреннего транспорта росли, достигнув 202.8 млн т CO_2 -экв. После 2015 г. наблюдалась тенденция к снижению выбросов, что связано с сокращением потребления топлива дорожным транспортом. В 2020-2021 гг. существенное влияние на функционирование всех видов транспорта оказала пандемия коронавируса. Введение ограничительных мер способствовало снижению выбросов в 2020 г. на 4% относительно 2019 г. Однако уже в 2022 г. рост выбросов от транспортного сектора возобновился. По данным Национального доклада о кадастре совокупные выбросы ПГ без учета землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства составили в 2023 г. 2082.9 млн т CO_2 -экв., при этом на сектор «Энергетика» приходилось

1649.5 млн. т CO_2 -экв. (НДК, 2025). Как показывают выполненные нами расчёты, в 2023 г. выбросы CO_2 , CH_4 и N_2O от внутреннего транспорта составили 218 млн т CO_2 -экв., что эквивалентно 10.5% совокупных выбросов ПГ с территории России или 13% выбросов ПГ от сектора «Энергетика». В компонентном составе выбросов преобладал диоксид углерода, на долю которого приходилось 98.8% совокупного выброса. Выбросы CH_4 и N_2O составили 0.3% и 0.9%, соответственно.

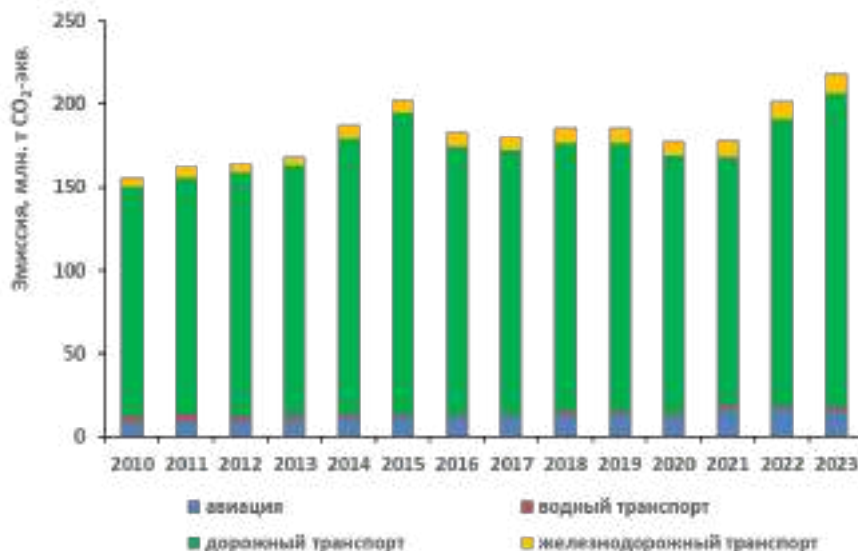


Рисунок 3. Динамика выбросов парниковых газов от внутреннего транспорта в России

Figure 3. Dynamics of greenhouse gas emission from domestic transport in Russia

Основной вклад в выбросы парниковых газов от сжигания топлива на транспорте вносит дорожный транспорт (86.4%), за ним с большим отрывом следуют авиация (6.7%), железнодорожный транспорт (5.5%) и водный транспорт (1.4%).

Выбросы парниковых газов при международных авиационных и морских перевозках с территории РФ за рубеж

Расчетные значения выбросов ПГ от международных морских и воздушных перевозок с территории РФ представлены на рис. 4. Динамика выбросов ПГ обусловлена межгодовой изменчивостью потребления топлива в международном сообщении. Как видно из рис. 4, выбросы от международных морских перевозок превалируют над выбросами от международных авиаперевозок.

С 2010 по 2014 гг. наблюдался рост выбросов ПГ от международных воздушных и морских перевозок с территории РФ. Выбросы достигли максимума в 2014 г. и составили 62.7 млн т CO_2 -экв. В 2015, 2016 гг. выбросы ПГ уменьшились, что обусловлено внешнеполитическими и внутриэкономическими факторами (сокращение числа популярных международных маршрутов на воздушном транспорте и отток транзитных бункеровок в результате

выравнивания цен на топливо в российских и зарубежных портах из-за девальвации рубля и снижения мировых цен на нефть на водном транспорте). В 2017-2019 гг. выбросы оставались примерно на одном и том же уровне, однако в 2020 году сократились на 35%, что связано с уменьшением потребления бункерного топлива вследствие пандемии коронавируса. Необходимо отметить, что из всего транспортного сектора отрасль международных воздушных перевозок значительно всего пострадала от пандемии Covid-19. Так, снижение выбросов в 2020 г. составило 53% относительно уровня 2019 г. В 2022 году в связи с закрытием воздушного пространства ЕС, Великобритании и США для российских авиаперевозчиков вследствие санкционных ограничений эмиссия ПГ от международных воздушных перевозок сократилась на 30% относительно 2021 года и составила 4.9 млн т CO₂-экв. В то же время, в связи с уходом крупнейших западных операторов контейнерных перевозок из российских портов на фоне санкций, выбросы ПГ от международных морских перевозок с территории РФ уменьшились на 14% по сравнению с уровнем 2021 г. Однако уже в 2023 г. потребление морского бункерного топлива начало увеличиваться, что связано с завершением процесса перестройки логистики после шоковой ситуации 2022 года. Западные линии стали постепенно замещаться российскими операторами и перевозчиками из дружественных стран. Кроме того, в 2023 г. наблюдался рост международных авиационных перевозок из крупных региональных аэропортов РФ в направлении курортов Азии и Ближнего Востока, что способствовало увеличению выбросов ПГ от воздушного транспорта до 5.9 млн т CO₂-экв. В 2023 г. суммарные выбросы CO₂, CH₄ и N₂O от международных морских и авиационных перевозок с территории РФ составили 28.8 млн т CO₂-экв., что выше уровня 2022 г. на 23.6%. В компонентном составе выбросов преобладает CO₂, на долю которого в 2023 году приходилось 99.5% общего выброса. Выбросы CH₄ и N₂O составили 0.1% и 0.4% соответственно.

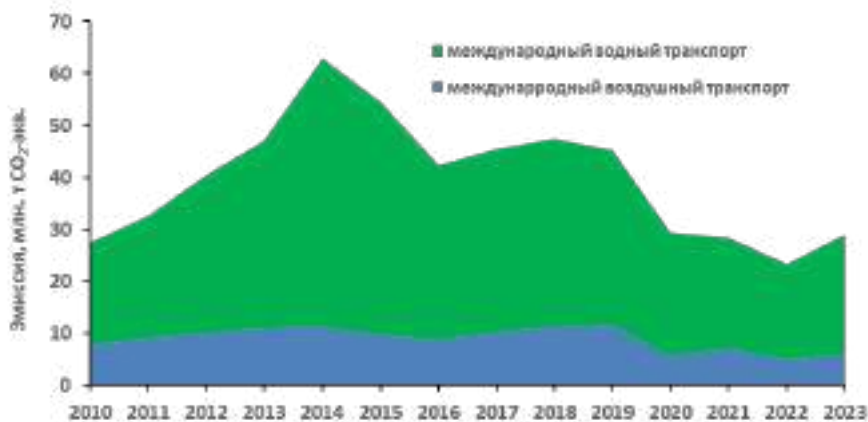


Рисунок 4. Общий эквивалентный выброс парниковых газов при международных авиационных и морских перевозках с территории РФ

Figure 4. Greenhouse gas emissions from international navigation from the territory of the Russian Federation

Драйверы изменения выбросов парниковых газов в транспортном секторе

Динамика выбросов ПГ от внутреннего транспорта и международных перевозок с территории РФ представлены на рис. 5. В период 2010-2023 гг. выбросы от внутреннего транспорта увеличились на 40% (рис. 5). Доля внутреннего транспорта в общем объеме выбросов ПГ от транспортного сектора выросла с 85% в 2010 г. до 88% в 2023 г. При этом, в 2023 г. международные авиационные и морские перевозки составили 3% и 9% общего объема выбросов ПГ от транспортного сектора РФ, соответственно.

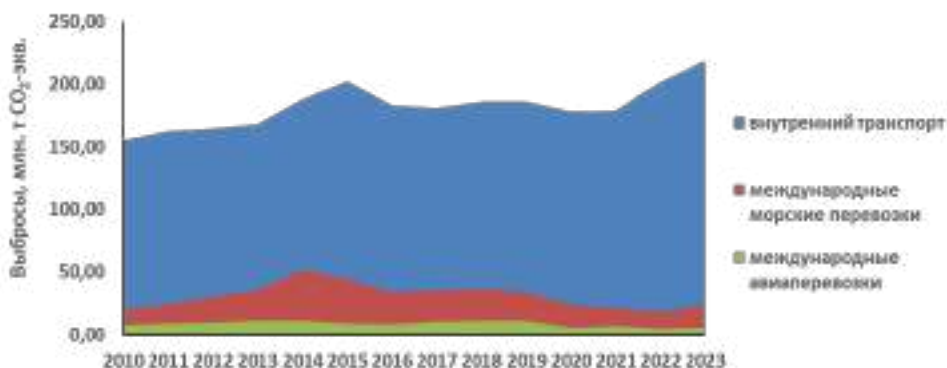


Рисунок 5. Динамика выбросов парниковых газов от внутреннего транспорта и международных перевозок с территории РФ

Figure 5. Greenhouse gas emissions from domestic transport and international transportation from the Russian Federation

За рассматриваемый период динамика выбросов ПГ определялась, в основном, тенденциями развития экономики и торговли. В 2020 и 2021 гг. существенное влияние на величину выбросов оказала пандемия Covid-19. Ограничения на перемещение пассажиров и грузов внутри России, а также на мировом уровне, закрытие границ и изоляция стран, разрыв цепочек поставок и падение спроса на товары оказали негативное влияние на все виды транспортных перевозок. В 2020 г. сокращение выбросов ПГ от внутреннего транспорта вследствие пандемии коронавируса составило 4% от уровня 2019 г., в то время как от международных воздушных и морских перевозок 53% и 29%, соответственно. Однако уже в 2022 г. выбросы от внутреннего транспорта превысили допандемийный 2019 год на 8.6%. В 2022 году российская транспортная отрасль столкнулась с сильнейшим давлением в виде санкций: они были реализованы как в виде прямых логистических ограничений (взаимное закрытие воздушного пространства и морских портов с государствами Евросоюза и США, запрет на движение автомобильного транспорта между Россией и членами ЕС), так и в виде ограничений торговли, которые в свою очередь повлияли и на транспортные потоки (Пердеро, Грушевенко и др., 2022). Наиболее сильно от западных санкций пострадала отрасль международных авиационных и морских перевозок. Так, закрытие воздушного

пространства ЕС и США для пролетов самолетов авиакомпаний РФ в 2022 году повлекло падение выбросов ПГ от авиации на 30%. В свою очередь, ограничения на перевозки через морские порты РФ, запрет российским судам на заход в европейские порты, уход крупнейших международных логистических операторов (Maersk, Hapag-Lloyd, FedEx, CMA и других) способствовали снижению выбросов от международных морских перевозок с территории РФ на 14%. В то же время, необходимо отметить, что несмотря на санкции, выбросы от дорожного и железнодорожного транспорта в 2022-2023 гг. показали рост.

По данным МЭА в 2023 г. глобальные эмиссии диоксида углерода от международного водного и воздушного транспорта достигли 706 и 544.91 млн. т. Таким образом, выбросы от международных морских и авиационных перевозок с территории России составляют 3.2% и 1.1% глобальной эмиссии, соответственно. В целом, мировые выбросы CO₂ от всего транспорта оцениваются в 7.6 Гт. Тогда, доля России в глобальной эмиссии от транспортного сектора составляет около 3%.

Заключение

Россия входит в число крупнейших мировых эмитентов ПГ. Несмотря на то, что вклад России в глобальные выбросы в целом сопоставим с долей её экономики и населения, динамика развития транспорта, рост автопарка и расширение логистических потоков требуют системного подхода к декарбонизации отрасли.

Переход к более экологически чистым видам транспорта, модернизация инфраструктуры, повышение энергоэффективности и стимулирование использования альтернативных видов топлива являются ключевыми направлениями, способными снизить воздействие на климат. Реализация этих мер позволит России не только уменьшить собственные выбросы, но и внести более весомый вклад в глобальные усилия по ограничению изменения климата, сохранив при этом устойчивость транспортной системы и конкурентоспособность экономики в условиях мирового энергетического перехода.

Результаты расчетов свидетельствуют, что в настоящее время транспортная отрасль в России адаптируется к санкциям и постепенно восстанавливается после кризиса. В ближайшие годы можно ожидать рост выбросов ПГ от транспортного сектора в связи с повышением спроса на транспортные услуги и замедлением темпов внедрения электротранспорта и декарбонизации транспортных средств. Кроме того, введение антироссийских санкций будет способствовать увеличению глобальной эмиссии ПГ за счет изменения международной транспортной логистики, увеличения транспортных издержек и использования менее эффективных транспортных коридоров и маршрутов. Так, например, закрытие воздушного пространства ряда зарубежных стран для российских авиакомпаний и зеркальные меры Москвы в отношении иностранных авиаперевозчиков привели к изменению авиамаршрутов и увеличению времени полетов между Европой и севером Азиатско-Тихоокеан-

ского региона – Японией, Южной Кореей и Китаем, а также на перелетах между США и Индией.

Дальнейшее совершенствование подходов к оценке выбросов ПГ от транспортного сектора будет способствовать получению более точных результатов, которые могут быть использованы для учёта и прогнозирования выбросов ПГ, а также разработки национальных мер, которые бы позволили смягчить негативное влияние транспорта на климат.

Список литературы

Грабар, В.А., Дмитриева, Т.М., Гитарский, М.Л. (2009) К оценке атмосферной эмиссии диоксида углерода от международных авиаперевозок из России, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXII, с. 207-215.

Грабар, В.А., Гитарский, М.Л., Дмитриева, Т.М., Глуховская, Е.П., Хорькова, Н.И., Киричков, С.В. (2011) Оценка эмиссии парниковых газов от гражданской авиации в России, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 30-38.

Грабар, В.А., Гитарский, М.Л., Говор, И.Л., Чернов, В.В. (2015) Эмиссия парниковых газов при международном сообщении водным транспортом, *Экология и промышленность России*, № 11, с. 28-31.

Дмитриева, Т.М., Грабар, В.А. (2017) Авиационные выбросы российской гражданской авиации при выполнении внутренних рейсов в 2000-2012 гг. и интегральная оценка их воздействия на климатическую систему, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 76-84.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год (2021) Москва, Росгидромет, 104 с.

Ершов, М.А., Савеленко, В.Д., Лядов, А.С., Махова, У.А., Капустин, В.М., Гинзбург, В.А., Лытов, В.М., Зеленова, М.С., Сафронов, Е.М. 2024. Сколько углерода в российских бензинах и авиатопливах? *Нефтегазовая вертикаль*, № 3, с. 84-93.

Зеленова, М.С., Лытов, В.М., Гинзбург, В.А., Савеленко, В.Д., Старостин, А.А., Ершов, М.А., Лядов, А.С., Зайнулин, С.М. (2024) Разработка национальных коэффициентов выбросов CO₂ от сжигания жидких топлив для использования в кадастре парниковых газов Российской Федерации, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 1-2, с. 30- 61, doi: 10.21513/0207-2564- 2024-1-2-30-61.

Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (2005) Женева, Секретариат РКИК ООН-ЮНОГ, 38 с.

Лытов, В.М., Трофименко, Ю.В., Гинзбург, В.А., Якубович, А.Н., Шелмаков, С.В., Деянов, Д.А., Шашина, Е.В., Зеленова, М.С., Зайнулин, С.М. (2024) Актуализация оценок выбросов парниковых газов от автомобильного

транспорта в национальном кадастре за 2010-2021 гг., *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 1-2, с. 101-123, doi: 10.21513/0207-2564-2024-1-2-101-123.

Национальный доклад о кадастре (НДК) антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2023 гг. (2025) Москва, ИГКЭ. В 2-х частях.

МГЭИК (2013) Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад рабочей группы I в пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. МГЭИК, 222 с.

Пердеро, А., Грушевенко, Е., Доброславский, Н., Гайда, И., Ляшик, Ю. (2022) *Декарбонизация магистральной логистики, Школа управления «Сколково»*, Москва, 160 с.

Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (2005) Женева, Секретариат РКИК ООН-ЮНОГ, 41 с.

Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2021 г. N 3052-р.

Трофименко, Ю.В., Гинзбург, В.А., Комков, В.И., Лытов, В.М. (2018) Влияние структуры парка автотранспортных средств по виду топлива и экологическому классу на выбросы парниковых газов, *Вестник СибАДИ*, т. 15, № 6.

Трофименко, Ю.В., Гинзбург, В.А., Якубович, А.Н., Лытов, В.М., Шелмаков, С.В., Зеленова, М.С. (2025) Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации, *Научный вестник МГТУ ГА*. 28(1) с. 78-96, <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96>.

IEA, (2020a) *Tracking Transport 2020*, International Energy Agency, Paris, France International Civil Aviation Organization (2019) ICAO global environmental trends. Present and future aircraft noise and emissions (A40-WP/54).

IPCC (2006) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by National Greenhouse Gas Inventories Programme*, Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. (eds.). Japan, IGES.

IPCC (2023) *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

Jaramillo, P, Kahn Ribeiro, S, Newman, P, Dhar S, Diemuodeke, O, Kajino, T, Lee, D, Nugroho, S, Ou, X, Hammer, Strømman, A, Whitehead, J. (2022) *Transport. In Shukla, P, Skea, J, Slade, R, Khourdajie, AA, van Diemen, R, McCollum, D, Pathak, M, Some, S, Vyas, P, Fradera, R, Belkacemi, M, Hasija, A, Lisboa, G, Luz, S, Malley, J, editors. Climate change 2022, mitigation of climate*

change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK and New York, NY, USA Cambridge University Press, pp. 1049-160.

Trofimenko, Y.V., Yakubovich, A.N., Lytov, V.M. (2023) Development of Approaches to Updated Database on the Vehicle Fleet of Various Countries for Assessing Gross Greenhouse Gas Emissions, *Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, pp. 1-5, doi: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332670.

Reference

Grabar, V.A., Dmitrieva, T.M., Gitarskij, M.L. (2009) K ocenke atmosfernoj emissii dioksida ugleroda ot mezhdunarodnyh aviaperevozok iz Rossii [On the estimation of atmospheric emissions of carbon dioxide from international flights operated from Russian territory], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXII, pp. 207-215.

Grabar, V.A., Gitarskij, M.L., Dmitrieva, T.M., Gluhovskaya, E.P., Hor'kova, N.I., Kirichkov, S.V. (2011) Ocenka emissii parnikovyh gazov ot grazhdanskoj aviacii v Rossii [Assessment of greenhouse gas emissions from civil aviation in Russia], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 30-38.

Grabar, V.A., Gitarskij, M.L., Govor, I.L., Chernov, V.V. (2015) Emissiya parnikovyh gazov pri mezhdunarodnom soobshchenii vodnym transportom [Greenhouse gas emissions from international waterborne transport], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, no. 11, pp. 28-31.

Dmitrieva, T.M., Grabar, V.A. (2017) Aviacionnye vybrosy rossijskoj grazhdanskoj aviacii pri vypolnenii vnutrennih rejsov v 2000-2012 gg. i integral'naya ocenka ih vozdeystviya na klimaticheskuyu sistemu [Emissions from Russian domestic civil aviation in 2000-2012 and integrated assessment of their impact on the climate system], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 8, pp. 76-84.

Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2020 god (2021) [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2020], Moscow, Russia, 104 p.

Ershov, M.A., Savelenko, V.D., Lyadov, A.S., Mahova, U.A., Kapustin, V.M., Ginzburg, V.A., Lytov, V.M., Zelenova, M.S., Safronov, E.M. (2024) Skol'ko ugleroda v rossijskih benzinah i aviatoplivah? [How much carbon is in Russian gasoline and aviation fuel?], *Neftegazovaya vertikal'*, no. 3, pp. 84-93.

Zelenova, M.S., Lytov, V.M., Ginzburg, V.A., Savelenko, V.D., Starostin, A.A., Ershov, M.A., Lyadov, A.S., Zajnulin, S.M. (2024) Razrabotka nacional'nyh koefitsientov vybrosov CO₂ ot szhiganiya zhidkih topliv dlya ispol'zovaniya v

kadastre parnikovyh gazov Rossijskoj Federacii [Development of country specific CO₂ emission factors from liquid fuel combustion for the National GHG inventory of the Russian Federation], *Ekologicheskij monitoring i modelirovanie ekosistem*, vol. HXXV, no. 1-2, pp. 30-61, doi: 10.21513/0207-2564- 2024-1-2-30-61.

Kiotskij protokol k Ramochnoj konvencii Organizacii Ob"edinennyh Nacij ob izmenenii klimata (2005) [Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change], Geneve, 38 p.

Lytov, V.M., Trofimenko, Yu.V., Ginzburg, V.A., Yakubovich, A.N., Shelmakov, S.V., Deyanov, D.A., Shashina, E.V., Zelenova, M.S., Zajnulin, S.M. (2024) Aktualizaciya ocenok vybrosov parnikovyh gazov ot avtomobil'nogo transporta v nacional'nom kadastre za 2010-2021 gg. [Updating of greenhouse gas emission estimates from road transport in the national inventory for 2010-2021], *Ekologicheskij monitoring i modelirovanie ekosistem*, vol. HXXV, no. 1-2, pp. 101-123, doi: 10.21513/0207-2564- 2024-1-2-101-123.

IPCC (2006) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. (eds.), Japan, IGES.

Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov ne reguliruemym Monreal'skim protokolom za 1990-2023 gg. (2025) IGKE, Moscow, Russia, v 2-h chastyah.

MGEIK (2013) *Izmenenie klimata. Fizicheskaya nauchnaya osnova*. Vklad rabochej grupy I v pyatyy ocenochnyj doklad Mezhpriatel'stvennoj grupy ekspertov po izmeneniyu klimata. MGEIK, 222 p.

Perdero, A., Grushevenko, E., Dobroslavskij, N., Gajda, I., Lyashik, Yu. (2022) *Dekarbonizaciya magistral'noj logistiki* [Decarbonization of linehaul logistics], Skolkovo, Moscow, Russia, 160 p.

Ramochnaya konvenciya Organizacii Ob"edinennyh Nacij ob izmenenii klimata (2005) [The United Nations Framework Convention on Climate Change], Geneve, 41 p.

Strategiya social'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyh gazov do 2050 goda (2021) [Strategy of Socio-economic Development of the Russian Federation with a Low Level of Greenhouse Gas Emissions until 2050], Government of the Russian Federation, Russia.

Trofimenko, Yu.V., Ginzburg, V.A., Komkov, V.I., Lytov, V.M. (2018) Vliyanie struktury parka avtotransportnyh sredstv po vidu topliva i ekologicheskomu klassu na vybrosy parnikovyh gazov [Influence of the motor vehicle parking structure by fuel type and ecological class on greenhouse gas emissions], *Vestnik SibADI*, vol. 15, no. 6, pp. 898-910.

Trofimenko, Yu.V., Ginzburg, V.A., Yakubovich, A.N., Lytov, V.M., Shelmakov, S.V., Zelenova, M.S. (2025) *Usovershenstvovannaya metodika raschetnogo*

monitoringa vybrosov parnikovyh gazov ot deyatel'nosti avtomobil'nogo i vnedorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii [Improved methodology for the calculated monitoring of greenhouse gas emissions from the activities of road and off-road transport in the Russian Federation], *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*, vol. 28, no. 1, pp. 78-96, <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96>.

IEA (2020) *Tracking Transport 2020*. International Energy Agency, Paris, France. International Civil Aviation Organization (2019) ICAO global environmental trends. Present and future aircraft noise and emissions (A40-WP/54).

IPCC (2006) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by National Greenhouse Gas Inventories Programme*, Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. (eds.). Japan, IGES, 2006

IPCC (2023) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 1- 34 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

Jaramillo, P, Kahn Ribeiro, S, Newman, P, Dhar, S, Diemuodeke, O, Kajino, T, Lee, D, Nugroho, S, Ou, X, Hammer Strømman, A, Whitehead, J. (2022) Transport. In: Shukla, P, Skea, J, Slade, R, Khourdajie, AA, van Diemen, R, McCollum, D, Pathak, M, Some, S, Vyas, P, Fradera, R, Belkacemi M, Hasija, A, Lisboa, G, Luz, S, Malley, J, editors. *Climate change 2022, mitigation of climate change*. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press, p. 1049-160.

Trofimenko, Y.V., Yakubovich, A.N., Lytov, V.M. (2023) Development of Approaches to Updated Database on the Vehicle Fleet of Various Countries for Assessing Gross Greenhouse Gas Emissions, *Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, Russia, pp. 1-5, doi: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332670.

Статья поступила в редакцию (Received): 26.08.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 09.12.2025.

Для цитирования / For citation:

Грабар, В.А., Лытов, В.М. (2025) Атмосферные выбросы парниковых газов от транспортного сектора в России за 2010-2023 гг., *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVI, № 3-4, с. 84-105, doi:10.24412/2782-3237-2025-3-84-105.

Grabar, V.A), Lytov, V.M. (2025) The atmospheric greenhouse gas emissions from transport sector in Russia for the years 2010-2023, *Ecological monitoring and modeling of ecosystems*. i.e. XXXVI. no. 3-4, pp. 84-105, doi:10.24412/2782-3237-2025-3-4-84-105.

**Аборигенная растительность стационара
Международной совместной программы комплексного
мониторинга в Центрально-Лесном государственном природном
биосферном заповеднике**

Т.Г. Махрова^{1), 2)}, А.Е. Кухта^{1)}, Е.А. Шуйская³⁾, Е.А. Шерстнева¹⁾*

¹⁾ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля»,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э.Баумана,
Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

³⁾Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник,
Россия, 172521, Тверская обл, Нелидовский м.о., пос. Заповедный, д. 32

*Адрес для переписки: anna_koukhta@mail.ru

Реферат. В Российской Федерации организацией, ответственной за выполнение Международной совместной программы комплексного мониторинга влияния загрязнения воздуха на экосистемы (МСП КМ) Экономической комиссии ООН для Европы, является ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля». Один из стационаров МСП КМ заложен на территории охранной зоны Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. Цель данной работы – проведение геоботанического описания аборигенной растительности на данном стационаре МСП КМ. Работы выполнялись в соответствии с Руководством по комплексному мониторингу (по методике МСП КМ). Получены характеристики древесного яруса, подроста, а также травянисто-кустарничкового и наземного ярусов. Сделано заключение о возможности проведения фонового экологического мониторинга, изучения сукцессии, а также выявления трендов уровня биоразнообразия экосистем на территории заповедника с помощью полученной информации.

Ключевые слова. Экологический мониторинг, бореальные экосистемы, растительность, сосна обыкновенная, антропогенное воздействие, изменение климата.

**Native vegetation of the International Joint Integrated Monitoring
Program site in the Central Forest State Nature Biosphere Reserve**

T.G. Makhrova^{1), 2)}, A.E. Koukhta^{1)}, E.A. Shuyskaya³⁾, E.A. Sherstneva¹⁾*

¹⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russian Federation

²⁾Mytishki Branch of Bauman Moscow State Technical University,
bldg. 1, 1st Institutskaya str., 1141005, Mytishchi, Moscow region, Russian Federation

³⁾Central-Forest State Nature Biosphere Reserve,
172521, Zapovedny settlement, Nelidovo district, Tver region, Russian Federation

*Correspondence address: anna_koukhta@mail.ru

Abstract. In the Russian Federation, the organization responsible for the implementation of the International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems (ICP IM) of the United Nations Economic Commission for Europe under the auspices of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution is the Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. One of the sites of the ICP IM network is located on the territory of the Central Forest State Nature Biosphere Reserve. The aim of this work was to prepare a geobotanical description of the native vegetation at this ICP IM site. The work was carried out in accordance with the Manual for Integrated Monitoring (according to the ICP IM methodology). The characteristics of the tree layer, undergrowth, as well as the herbaceous-shrub and ground layers were obtained. A conclusion was made about the possibility of conducting background environmental monitoring, studying succession, and identifying trends in the biodiversity levels of ecosystems in the reserve using the information obtained.

Keywords. Environmental monitoring, boreal ecosystems, vegetation, Scot's pine, anthropogenic impact, climate change.

Введение

С 1992 г. Российская Федерация участвует в выполнении Международной совместной программы комплексного мониторинга влияния загрязнения воздуха на экосистемы (МСП КМ) под эгидой Конвенции по трансграничному переносу загрязнений на большие расстояния Экономической комиссии ООН для Европы. Координационно-методическое руководство работами на российской сети станций МСП КМ в России осуществляет ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (ИГКЭ), в котором создан Национальный научно-координационный центр программы (ННКЦ)¹⁾. ННКЦ выполняет сбор данных с сети стационаров, статистическую обработку и анализ полученных результатов, формирование и ведение Национальных баз данных, а также ежегодное представление отчетных материалов в Международный центр данных по окружающей среде (ЦДОС) (Уппсала, Швеция). Работы в рамках МСП КМ проводят по ряду методик, собранных в Руководстве по комплексному мониторингу (Руководство..., 2013).

Один из стационаров МСП КМ в Российской Федерации заложен на территории охранной зоны Центрально-Лесного государственного природного государственного биосферного заповедника (56°26'–56°31' с.ш.; 32°29'–33°29' в.д.).

¹⁾ Международная совместная программа комплексного мониторинга (МСП КМ), URL: <http://www.igce.ru/performance/international/icp-im/>.

Заповедник расположен на западе Европейской части России, на главном Каспийско-Балтийском водоразделе Русской равнины, на водоразделе верховьев р. Волга и р. Западная Двина, на юго-западной оконечности Валдайской возвышенности в Тверской области. На данной особо охраняемой природной территории (ООПТ) берут начало реки Тюдма, Жукопа и Тудовка (притоки Волги), а также р. Межа, впадающая в Западную Двину. Заповедник по классификации Б.П. Алисова (1956) относится к области умеренного климата, атлантического и континентального влияния. С 1931 г. сохраняются уникальные коренные старовозрастные сообщества лесов южной тайги с характерной структурой и видовым составом, а также обширные участки ненарушенных верховых болот.

Основной целью биотического блока МСП КМ является регистрация и анализ откликов отдельных видов растений и фитоассоциаций на антропогенное загрязнение атмосферного воздуха вследствие трансграничного переноса загрязняющих веществ, а также на изменение климата. Таким образом, программа осуществляет мониторинг биоразнообразия лесных экосистем. Для выявления и оценки трендов состояния природных биоценозов необходима информация о статусе растительного покрова на период начала наблюдений.

Оценка состояния экосистем в рамках МСП КМ производится с учетом лесорастительных и эдафических условий, которые маркирует растительность. Для выполнения программы необходимо использовать информативное описание аборигенной растительности и её местообитаний на пробных площадях стационара. Данные для осуществления программы следует получать из научной литературы, а также в результате полевых исследований, выполненных сотрудниками ФГБУ «ИГКЭ» и ООПТ.

Ранее при закладке пробных площадей на стационаре МСП КМ было сделано краткое описание лесорастительных условий на пробных площадях, необходимое для определения типов леса и местообитаний (Кухта и др., 2018). Затем в 2019 силами сотрудников ФГБУ «ИГКЭ» и Дендрологического сада Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана было проведено более детальное обследование растительности на изучаемых пробных площадях (ПП).

Целью данной работы являлось проведение геоботанического описания аборигенной растительности на стационаре в заповеднике для осуществления экологического мониторинга в рамках МСП КМ.

Регион исследований

Заповедник расположен в границах хвойно-широколиственной зоны. Климат территории определяется влажными и тёплыми атлантическими воздушными массами, которые часто вытесняются потоками холодного арктического воздуха. Общее количество осадков превышает суммарное испарение, что обуславливает положительный водный баланс территории. Заповедник является эталоном естественного разнообразия лесных почв южнотаёжной подзоны с высокой пространственной мозаичностью. Благодаря большому распространению покровных суглинков и характеристикам водного баланса,

почвы избыточно увлажнены, что ведёт к прогрессирующему поверхностному заболачиванию. Циклически повторяющиеся массовые ветровалы лесных участков способствуют большой мозаичности типов лесонасаждений.

Природные комплексы территории типичны для южно-таежной подзоны и размещаются на моренном рельефе. В структуре растительного покрова заповедника доминирующее положение занимают ельники, представленные целостным, относительно ненарушенным массивом (40%). Доминирующее положение в структуре еловых лесов (60%) занимают ельники кисличные и черничные, которые расположены в плакорных местообитаниях с комплексом подзолистых почв. Неморальные ельники (17% еловых лесов) в условиях водораздельной равнины смещены на дренированные склоны водоразделов, где преобладают дерново-палево-подзолистые почвы. Липа, клен, ильм образуют в этих лесах второй подъярус древостоя или густой подлесок. Наземный ярус обогащен неморальными травами. К заболоченным сфагново-черничным и сфагновым ельникам относится 15% еловых лесов заповедника (Кураева и др., 1999; Писарчук и др., 2016).

Кроме еловых лесов, коренными формациями являются сосновые леса сфагновой классификационной группы (10%). Сфагновые и сфагново-багульниковые сосняки произрастают по краям болот (Кураева и др., 1999; Пузаченко, Широная, 2020).

Также характерны черноольховые леса (1%), приуроченные к логом, долинам ручьев и рек. Болотная растительность олиготрофного и мезотрофного типов занимает 4% территории (Кураева и др., 1999; Новенко и др., 2011).

Небольшую роль в структуре растительного покрова играет луговая растительность, представленная как пойменными, так и вторичными суходольными лугами (1%), а также прибрежная и водная растительность. Отмечены мелколиственные леса, возникшие в результате зарастания ветровалов, распада перестойных древостоев, пожаров, а также рубок, проводившихся в период закрытия заповедника (1951-1960 гг.), и залежей. Производные леса из березы пушистой, осины и ольхи серой занимают около 43% всей территории (Кураева и др., 1999; Пузаченко, Широная, 2020). Во флоре представлены бореальные (голарктические, евроазиатские и восточноевропейско-сибирские) и неморальные виды (европейские, реже средневропейские и восточноевропейские). С учётом последних дополнений и новых находок на территории заповедника (Кадастровые сведения ..., 2025) выявлено 115 видов водорослей, 927 видов грибов, 432 вида лишайников, 270 видов мохообразных, 595 видов сосудистых растений.

Старосельский мох представляет собой болотную систему, расположенную в группе сточных котловин на водораздельной территории рек, Межа, относящейся к Западновинскому бассейну, и Тудовка, принадлежащей Волжскому бассейну. Площадь болотного массива в границах торфяной залежи составляет 617 га. Разгрузка вод происходит в 3 ручья и систему небольших депрессий (логов). Уровень воды колеблется от 0 до 0.6 м (Minayeva et al., 2007).

Растительный покров типичен для верховых болот южной тайги: окрайки на пологих склонах формируются фитоассоциациями *Vacinio uliginosi-Pinetum sylvestris* Kliet 1929 em. Matuszkiewicz 1962. Их первый ярус сформирован достигающими 20 м деревьями сосны, в нижних ярусах доминируют кустарнички. На плоских участках окрайки развиваются сообщества из *Caricetum rostratae* Osvald 1923 em. Dierssen 1982 с древостоем сосны, реже березы или вовсе без древостоя. При наличии разгрузки минеральных вод в подобных местообитаниях произрастают елово-березовые леса класса *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et Tx. 1943. Такие ценозы характерны для восточной части болота практически по всему его периметру. Пологие склоны южной выпуклой части болота представляют собой грядово-мочажинные комплексы. В восточной части отмечен типичный облесенный грядово-мочажинный комплекс с грядами из *Ledo-Sphagnetum fusci* Du-Ruetz 1921 с доминированием бореальных видов (карликовая березка, морошка) и мочажинами с ценозами *Rhynchosporion albae* Koch 1926. Западная часть представлена необлесенным грядово-мочажинным комплексом. Здесь на грядах обычны сообщества из *Sphagnion medii* Kaestner & Flossner 1933 em. Dierssen in Oberdorfer et al. 1977. В обоих типах биотопов в мочажинах доминируют *Sphagnum angustifolium* (C. Jens. ex Russow) C. Jens., *S. balticum* (Russow) Russow ex C. Jens., *S. cuspidatum* Ehrh. ex Hoffm. У подножия склонов расположены озерки с доминированием *S. cuspidatum* Ehrh. Ex Hoffm., *Gymnocolea inflata* (Huds.) Dum. Верхние части склонов образованы сосняками с преобладанием *Pinus sylvestris* f. *Litwinovii* и сообществами бореальной ассоциации *Ledo-Sphagnetum fusci* Du-Ruetz 1921 («рямами») (Писарчук и др., 2016; Пузаченко, Широная, 2020; Minayeva et al., 2007).

В северной части болотного массива протекает ряд водотоков. Здесь доминируют мезотрофные сообщества *Caricetum lasiocarpae* Osvald 1923 em. Dierssen 1982 и сфагновые топи с ассоциациями союза *Rhynchosporion*. Для северо-восточной части характерны деградированные комплексы с доминированием печеночников в моховом покрове и *Baeothryon cespitosum* (L.) A. Dietr. Эта часть болота вытянута в отрог, называемый Ясновицким мхом, где в условиях разгрузки грунтовых вод преобладают сосново-березовые сообщества с тростником (Пузаченко, Широная, 2020; Minayeva et al., 2007).

Методика

Согласно Руководству (Руководство..., 2013) в границах стационара МСП КМ были заложены две ПП размером приблизительно 40х40 м в двух репрезентативных для региона исследований фитоценозах – в сосняке сфагновом и ельнике разнотравном.

На каждой пробной площади для описания подроста, травянисто-кустарничкового и напочвенного ярусов случайным образом было заложено по 12 площадок размером 1х1 м. На заложённых площадках отсутствовали последствия нежелательного внешнего воздействия (например, внедрения инвазивных видов или повышенной рекреации). Участки с нерепрезентатив-

ными видами субстрата (например, в которых камень или бревно занимают значительную площадь) исключались из описаний.

Растительность пробных площадок была разделена на ярусы в соответствии с высотой и морфологией особей:

- древесный ярус – деревья высотой более 5 м;
- возобновление (подрост) – деревья высотой 1-5 м;
- травянисто-кустарниковый ярус – кустарники, кустарнички и другие сосудистые растения;
- напочвенный ярус – мхи и лишайники.

В соответствии с данной классификацией, древесные виды могут присутствовать как в древесном, так и в травянисто-кустарниковом ярусе. Названия видов приведены по ресурсу.²⁾

Основным измеряемым параметром травянистого и напочвенного ярусов являлось проективное покрытие для каждого вида (в %). Кроме того, для кустарничково-травянистого яруса определялись следующие показатели: обилие по Друде (Drude, 1890), проективное покрытие (%), фенологическое состояние, жизненность по Браун-Бланке-(Braun-Blanquet, Pavillard, 1922), жизненная форма по Раункиеру (Raunkiaer, 1905; 1907).

Описание растительности в данной работе представлено для пробной площади МСП КМ № 2 (ПП2), расположенной в сосняке сфагновом на окраине болота Старосельский мох (рис. 1).

Как указано выше, работы были проведены 15.07.2019 силами сотрудников ФГБУ «ИГКЭ» и Дендрологического сада Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Результаты и обсуждение

Площадь ПП2 равна 1600 м². Экосистема представляет собой сосняк сфагновый. В древостое доминирует сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Подлесок отсутствует, отмечено возобновление сосны (*P. sylvestris*), березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), осины (*Populus tremula* L.), ели европейской (*Picea abies* (L.) Н.Карст.).

Пробная площадь ПП2 размещена на окраине сфагнового болота. Для биогеоценоза характерен микрорельеф с небольшими неровностями (кочки). Характеристика древостоя на ПП2 представлена в табл. 1.

Возобновление древостоя в границах ПП2 учитывалось на площадках размером 2 м². Описание подроста представлено в табл. 2.

Травянисто-кустарниковый ярус был описан на пробных площадках размером 1х1 м, расположенных случайным образом (рис. 2 а,б).

Результаты исследования травянисто-кустарникового покрова представлены в табл. 3.

На пробных площадках определялись классы встречаемости травянисто-кустарниковых видов. Данная характеристика вычислялась как % пло-

²⁾ The Plant List. – URL: <http://theplantlist.org>.

щадок, на которых встречен данный вид (вне зависимости от численности). Результаты представлены в табл. 4. Из сфагновых мхов определены 3 вида: *Sphagnum angustifolium* (Russ. ex Russ.) C. Jens, *S. divinum* Flatberg & K. Hassel и *S. fuscum* (Schimp.) Klinggr. Проективное покрытие каждого вида отдельно не оценивалось.



Рисунок 1. Пробная площадь МСП КМ в сосняке сфагновом (автор фотографии – Т.Г. Махрова)

Figure 1. ICP IM sample area in a sphagnum pinewood (photo by T.G. Makhrova)

Таблица 1. Характеристика древостоя на пробной площади МСП КМ

Table 1. Stand characteristics of the ICP IM sample area

Характеристики	ПП2
Преобладающая порода	<i>Pinus sylvestris</i>
Степень сомкнутости крон	0.1
Ярус	1
Число деревьев	50
Состав по числу	50 <i>P. sylvestris</i>
Состав по массе	100% <i>P. sylvestris</i>
Средний диаметр стволов, см	39.7
Средняя высота, м	12.8
Средний диаметр крон, м	2.6
Подлесок	нет

Таблица 2. Возобновление древостоя на пробной площади МСП КМ

Table 2. Forest stand renewal on the ICPIM sample area

№ площадки	Порода	Количество экземпляров
1	<i>P. sylvestris</i>	1
2	<i>B. pubescens</i>	1
	<i>P. tremula</i>	1
3	<i>P. abies</i>	1
4	<i>P. abies</i>	1
5	<i>P. abies</i>	1



Рисунок 2. Травяно-кустарничковый ярус на пробной площади МСП КМ (автор фотографий – Т.Г. Махрова)

Figure 2. Herbaceous-shrubby cover on the ICP IM sample area (photo by T.G. Makhrova)

Таблица 3. Травянисто-кустарничковый покров на пробной площади МСП КМ.

Table 3. Herbaceous-shrubby cover on the ICP IM sample area

№ площадки	Виды растений	Проективное покрытие, %
№ 1	<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	60
	<i>Ledum palustre</i> L.	10
№ 2	<i>Vaccinium uliginosum</i> L.	30
	<i>V. vitis-idaea</i>	50
№ 3	<i>E. vaginatum</i> L.	70
	<i>V. vitis-idaea</i>	30
№ 4	<i>E. vaginatum</i>	90
	<i>Ledum palustre</i>	10
	<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	20
№ 5	<i>E. vaginatum</i>	100
№ 6	<i>V. uliginosum</i>	50
	<i>V. myrtillus</i>	50
№ 7	<i>V. myrtillus</i>	100
№ 8	<i>V. myrtillus</i>	100
№ 9	<i>E. vaginatum</i>	100
	<i>V. myrtillus</i>	90
№ 10	<i>V. vitis-idaea</i>	60

Таблица 4. Классы встречаемости видов на пробной площади МСП КМ

Table 4. Species occurrence classes on the ICP IM sample area

Вид	Класс встречаемости
<i>Eriophorum vaginatum</i>	3
<i>Ledum palustre</i>	5
<i>Hylocomium splendens</i>	5
<i>Sphagnum</i> sp.	2
<i>Vaccinium myrtillus</i>	2
<i>Vaccinium uliginosum</i>	5
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	4

Показатели состояния кустарничково-травянистого яруса сосняка багульниково-пушицево-сфагнового на ПП2 представлены в табл. 5.

На исследованной ПП2 в сосняке сфагновом общее проективное покрытие растительности составляет 100%. Отмечен зелёный аспект. Отсутствует разделение на подъярусы.

Таблица 5. Показатели состояния кустарничково-травянистого яруса на пробной площади МСП КМ

Table 5. Shrub-herb layer state indicators on the ICP IM sample area

Видовой состав	Обилие	Проективное покрытие, %	Фенологическое состояние	Жизненность (Браун- Бланке, Павияр, 1922)	Жизненная форма (Раункьер, 1905, 1907)
<i>Eriophorum vaginatum</i>	cop1	0.28	вегетация после плодоношения	2	фанерофит
<i>Ledum palustre</i>	sp	0.02	массовое созревание плодов	3	фанерофит
<i>Vaccinium myrtillus</i>	cop2	14	вегетация	3	фанерофит
<i>Vaccinium uliginosum</i>	cop1	6	вегетация	3	фанерофит
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	cop2	14	вегетация начало созревания плодов	1	фанерофит

Результаты изучения травянисто-кустарничкового и наземного ярусов, а также древостоя и возобновления согласуются с ранее опубликованными данными о растительности заповедника (Писарчук и др., 2016; Пузаченко, Широная, 2020; Minayeva et al., 2007). Исследованные фитоценозы типичны для мало нарушенных южно-таёжных экосистем; их состояние свидетельствует о фоновом уровне антропогенного воздействия на бореальные фитоценозы района исследований. Отсутствие значимых последствий антропогенных воздействий характерно для экосистем заповедника, основанного с целью сохранения хвойно-широколиственных южно-таежных коренных лесов на моренных водораздельных равнинах центра Русской равнины³⁾.

Заключение

В результате проведённых в охранной Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника исследований получены характеристики древесного яруса, подроста, а также травянисто-кустарничкового и наземного ярусов на пробной площади стационара МСП КМ в сосняке сфагновом. Определены такие параметры состояния аборигенной растительности, как классы встречаемости видов, их обилие, проективное покрытие, жизненные формы растений, их фенологическое состояние и жизненность.

³⁾ <https://clgz.ru/node/18448>.

Полученные характеристики типичны для ненарушенных лесных экосистем бореального биома и свидетельствуют о фоновом характере антропогенного воздействия (в том числе и трансграничного переноса загрязняющих веществ) на биогеоценозы. Следовательно, описание аборигенной растительности стационара МСП КМ может быть использовано как отправная точка для многолетнего экологического мониторинга, изучения сукцессии, а также выявления трендов уровня биоразнообразия экосистем территории.

Список литературы

- Алисов, Б.П. (1956) *Климат СССР*, М., Изд. Моск. ун-та.
- Кадастровые сведения о Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике за 2021-2024 гг.* (2025) Рукопись, Архив Центрально-Лесного заповедника, 213 с.
- Кураева, Е.Н., Минава, Т.Ю., Шапошников, Е.С. (1999) Типологическая структура и флористическое разнообразие сообществ, *Сукцессионные процессы в заповедниках России и проблемы биологического разнообразия*, под ред. О.В. Смирновой, Е.С. Шапошникова, Спб., РБО, с. 314-317.
- Кухта, А.Е., Пчелкин, А.В., Полешук, А.М. (2018) Оценка отклика древостоев сосны и ели Центрально-Лесного государственного природного заповедника на трансграничное загрязнение воздуха методами Международной совместной программы комплексного мониторинга, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXIX, № 4, с. 29-43.
- Новенко, Е.Ю., Носова, М.Б., Красноруцкая, К.В. (2011) Особенности поверхностных спорово-пыльцевых спектров южной тайги восточно-европейской равнины, *Известия ТулГУ. Естественные науки*, № 2, с. 345-354.
- Писарчук, Н.М., Новенко, Е.Ю., Козлов, Д.Н., Шилов, П.М. (2016) Влияние климатических изменений на лесные экосистемы и процессы заболачивания в Центрально-Лесном заповеднике, *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, № 4, с. 338-340.
- Пузаченко, М.Ю., Широня, И.И. (2020) Организация и динамика органо-генного рельефа верхового болота, *Princ. ekol.*, № 3 (37), с. 45-55.
- Руководство по комплексному мониторингу* (2013) Перевод с английского, М., ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», URL: http://downloads.igce.ru/publications/ICP_IM_Manuals/Manual_rus_04122013.pdf (дата обращения: 26.12.2024).
- Braun-Blanquet, J., Pavillard, Ju. (1922) *Vocabulaire de Sociologie Végétale*, Montpellier, Roumégous et Déhan, 16 p.
- Drude, O. (1890) *Handbuch der Pflanzengeographie*, Stuttgart, J. Engelhorn, 582 p.
-

Minayeva, T.Y., Glushkov, I., Nosova, N.B., Starodubtseva, O., Kuraeva, E., Volkova E. (2007) An outline of the swamps of the Central Forest Reserve, *Kompleksnye issledovaniia v Tsentral'no-Lesnom gosudarstvennom prirodnom biosfernom zapovednike: Ikh proshloe, nastoiashchee i budushchee* (Integrated studies in the Central-Forest State Nature Biosphere Reserve: Their Past, Present and Future), Tula, Grif and Ko, pp. 267-296.

Raunkiaer, C. (1905) *Types biologiques pour la geographiebotanique*, Oversigt over det Kgl., Danske Videnskabernes, Selsk. Forhandl., no. 5.

Raunkiaer, C. (1907) *Planterigets Livsformesogderes Betydning for Geografien*. Koebenhavneg Kristiania.

References

Alisov, B.P. (1956) *Klimat SSSR* [Climate of the USSR], Moscow, Russia, 128 p.

Kadastryvyye svedeniya o Tsentral'no-Lesnom gosudarstvennom prirodnom biosfernom zapovednike za 2021-2024 gg. [Cadastral information of Central Forest State Nature Biosphere Reserve for 2021-2024] (2025) Manuscript, Archive of the Central Forest Reserve, 213 p.

Kuraeva, E.N., Minava, T.Y., Shaposhnikov, E.S. (1999) Tipologicheskaya struktura i floristicheskoe raznoobrazie soobshestv, *Succession processes in Russian nature reserves and problems of biological diversity*, in O.V. Smirnova, E.S. Shaposhnikov. (eds.), St. Petersburg, RBO, pp. 314-317.

Koukhta, A.Ye., Pchelkin, A.V., Poleshchuk, A.M. (2018) Otsenka otklika drevostoyev sosny i yeli Tsentral'no-Lesnogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika na transgranichnoye zagryazneniye vozdukha metodami Mezhdunarodnoy sovmestnoy programmy kompleksnogo monitoringa [Assessment of the response of pine and spruce stands of the Central Forest State Nature Reserve to transboundary air pollution using the methods of the International Co-operative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXIX, no. 4, pp. 29-43.

Novenko, E.Yu., Nosova, M.B., Krasnorutskaya, K.V. (2011) Osobennosti poverkhnostnykh sporovo-pyl'tsevykh spektrov yuzhnoy taygi vostochno-yevropeyskoy ravniny [Features of surface spore-pollen spectra of the southern taiga of the East European Plain], *Izvestiya TulGU. Yestestvennyye nauki*, no. 2, pp. 345-354.

Pisarchuk, N.M., Novenko, E.Yu., Kozlov, D.N., Shilov, P.M. (2016) Vliyaniye klimaticheskikh izmeneniy na lesnyye ekosistemy i protsessy zabolachivaniya v Tsentral'no-Lesnom zapovednike [The Impact of Climate Change on Forest Ecosystems and Swamping Processes in the Central Forest Reserve], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, no. 4, pp. 338-340.

Puzachenko, M.Yu., Shironya, I.I. (2020) Organizatsiya i dinamika organogenного rel'yefa verkhovogo bolota [Organization and dynamics of organogenic relief of raised bog], *Princ. ekol.*, no. 3(37), pp. 45-55.

Rukovodstvo po kompleksno mumonitoringu [Guide to Integrated Monitoring] (2013) Translation from English, Federal State Budgetary Institution "IGKE Roshydromet and RAS", Moscow, Russia, URL: http://downloads.igce.ru/publications/ICP_IM_Manuals/Manual_rus_04122013.pdf (accessed: 26.12.2024).

Braun-Blanquet, J., Pavillard, Ju. (1922) *Vocabulaire de Sociologie Végétale*, Montpellier, Roumégous et Déhan, 16 p.

Drude, O. (1890) *Handbuch der Pflanzengeographie*, Stuttgart, J. Engelhorn, 582 p.

Minayeva, T.Y., Glushkov, I., Nosova, N.B., Starodubtseva, O., Kuraeva, E., Volkova E. (2007) An outline of the swamps of the Central Forest Reserve, *Kompleksnye issledovaniia v Tsentral'no-Lesnom gosudarstvennom prirodnom biosfernom zapovednike: Ikh proshloe, nastoiashchee i budushchee* (Integrated studies in the Central-Forest State Nature Biosphere Reserve: Their Past, Present and Future), Tula, Grif and Ko, pp. 267-296.

Raunkiaer, C. (1905) *Types biologiques pour la géographiebotanique*, Oversigt over det Kgl., Danske Videnskabernes, Selsk. Forhandl., no. 5.

Raunkiaer, C. (1907) *Planterigets Livsformesogderes Betydning for Geografien*. Koebenhavneg Kristiania.

Поступила в редакцию: 30.07.2025

Доработана после рецензирования: 13.11.2025.

Для цитирования / For citation:

Махрова, Т.Г., Кухта, А.Е., Шуйская, Е.А. Шерстнева, Е.А. (2025) Аборигенная растительность стационара Международной совместной программы комплексного мониторинга в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVI, № 3-4, с. 106-118, doi:10.21513/0207-2564-2025-3-4-106-118.

Makhrova, T.G., Koukhta, A.E., Shuyskaya, E.A., Sherstneva, E.A. (2025) Native vegetation of the International Joint Integrated Monitoring Program site in the Central Forest State Nature Biosphere Reserve, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVI, no. 3-4, pp. 106-118, doi:10.21513/0207-2564-2025-3-4-106-118.

Флористическое разнообразие живого напочвенного покрова в сосняках природно-исторического парка «Кузьминки-Люблино»

С.А. Коротков^{1,2)*}, Д.В. Лежнев^{2,3)}, А.Р. Фейзрахманов¹⁾, Н.Ф. Кривошапов¹⁾

¹⁾МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана,
РФ, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²⁾Институт лесоведения РАН,
РФ, 143030, Московская обл., Одинцовский г.о., с. Успенское, ул. Советская, д. 21

³⁾Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева,
РФ, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

*Адрес для переписки: skorotkov-71@mail.ru

Реферат. Рассмотрен флористический состав и структура живого напочвенного покрова сосновых насаждений природно-исторического парка «Кузьминки-Люблино». На примере 5 постоянных пробных площадей, расположенных равномерно по всей территории парка, общей площадью 0.3 га каждая, рассмотрен флористический состав травянистого яруса сосняков. Общая площадь проективного покрытия площадей составляет 75-95%. Всего на территории 5 пробных площадей было зарегистрировано 57 видов травянистых растений, принадлежащих к 28 семействам и 50 родам. Семейства с наибольшим числом зарегистрированных видов – *Lamiaceae*, *Asteraceae*, *Poaceae*, *Rosaceae*. Наиболее встречаемые виды сосудистых растений – *Athyrium filix-femina* (L.) Roth ex Mert., *Chelidonium majus* L., *Convallaria majalis* L., *Fragaria vesca* L., *Geum urbanum* L., *Rubus idaeus* L. и т.д. Виды с наибольшей площадью проективного покрытия – *Impatiens parviflora* DC, *Carex pilosa* Scop. В ходе исследования было обнаружено 3 вида адвентивных растений. Наиболее представленная эколого-ценотическая группа на объекте исследования – неморальная. Кроме нее, в значительной степени распространены виды из луговой, нитрофильной и бореальной групп. Преобладание неморальной эколого-ценотической группы может говорить о идущих в лесопарке процессах неморализации. Наличие адвентивных и нетипичных для лесных сообществ видов свидетельствует о том, что данные фитоценозы подвержены антропогенному воздействию.

Ключевые слова. Флористическое разнообразие, напочвенный покров, сосняки сложные, проективное покрытие, адвентивные виды, неморализация, антропогенное воздействие, Москва.

Floristic diversity of living ground cover in the pine forests of the Kuzminki-Lyublino natural historical park

S.A. Korotkov^{1,2,}, D.V. Lezhnev^{2,3)}, A.R. Feizrakhmanov¹⁾, N.F., Krivoschapov¹⁾*

¹⁾ Mytishki Branch of Bauman Moscow State Technical University,
1, Pervaya Institutskaya str., 141005, Mytishki, Moscow region, Russian Federation

²⁾ Institute of Forest Sciences RAS,
21, Sovetskaya str., 143030, Uspenskoe, Moscow region, Russian Federation

³⁾ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academ,
49, Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation

*Correspondence address: *skorotkov-71@mail.ru*

Abstract. The floral composition and structure of the living ground cover of pine plantations of the Kuzminki-Lyublino Natural Historical Park are considered. Using the example of 5 permanent observation plots located evenly throughout the park, with a total area of 0.3 hectares each, the floral composition of the grassy tier of pine forests is considered. The total area of the observation plots coverage is 75-95%. In total, more than 50 species of herbaceous plants belonging to 28 families and 50 genera were registered on the territory of 5 observation plots. The families with the largest number of recorded species are *Lamiaceae*, *Asteraceae*, *Poaceae*, *Rosaceae*. The most common vascular plant species are *Athyrium filix-femina* (L.) Roth ex Mert., *Chelidonium majus* L., *Convallaria majalis* L., *Fragaria vesca* L., *Geum urbanum* L., *Rubus idaeus* L., etc. The species with the largest area of projective coverage are *Impatiens parviflora* DC, *Carex pilosa* Scop. During the study, 3 types of adventitious plants were discovered. The most widely represented ecological- coenotic group at the research site is the nemoral one. In addition, species from the meadow, nitrophilic, and boreal groups are widespread. The predominance of the nemoral ecological and coenotic group may indicate the ongoing processes of nemoralization in the forest park. The presence of adventitious and non-typical species for forest communities indicates that these phytocenoses are susceptible to anthropogenic impact.

Keywords. Floristic diversity, living ground cover, complex pine forests, projective coverage, adventitious types, nemoralization, anthropogenic impact, Moscow.

Введение

Живой напочвенный покров (ЖНП) является важным структурным компонентом лесных биогеоценозов, выполняющим средообразующие, фитocenотические и индикационные функции (Морозов, 1930; Мелехов, 1980; Обыденников и др., 2005; Лежнев, 2023; Коротков и др., 2024). В условиях урбанизированной среды, где лесные экосистемы испытывают комплексное воздействие рекреационной нагрузки и климатических изменений, изучение

состояния ЖНП приобретает особую актуальность для оценки устойчивости и динамики лесных насаждений, так как он выполняет роль индикатора наиболее успешно среди всех компонентов растительных сообществ (Лежнев, Меняева, 2024; Андреев, Шаповал, 2025; Danilov et al., 2020; Lezhnev et al., 2024).

Сосновые фитоценозы, которые широко распространены в пределах Москвы и Московской области и являются объектом интенсивного рекреационного использования. Исследования в подобных урбанизированных лесах, таких как национальный парк «Лосиный Остров» и Лесная опытная дача Тимирязевской академии, демонстрируют высокую чувствительность видового состава и структуры ЖНП к антропогенному прессингу (Лежнев, 2023; Лежнев, Меняева, 2024). В частности, установлено, что под его влиянием происходит упрощение ценотической структуры, обеднение видового разнообразия и увеличение доли рудеральных и адвентивных видов (Коротков и др., 2024; Lezhnev et al., 2024).

Природно-исторический парк (ПИП) «Кузьминки-Люблино» – один из крупнейших лесопарков Москвы, в котором сосна является одной из доминирующих пород. Расположен ПИП на территории Юго-Восточного административного округа, занимая площадь 1189 га.

Несмотря на то, что парк находится посреди густонаселенной городской застройки, комплексные флористические исследования, акцентированные на ЖНП, с закладкой постоянных пробных площадей (ППП) на территории природно-исторического парка до этого практически не проводились (Андреев, Шаповал, 2025). Как правило, работы со схожей тематикой в Московском регионе либо затрагивают другие лесопарковые территории (Полякова, Меланхолин, 2020; Лебедев, Гостев, 2023; Семенюк и др., 2023; Лежнев, Меняева, 2025; Lezhnev et al., 2024), либо сосредоточены на изучении других аспектов растительных сообществ, таких, как показатели их трансформации и верхние ярусы насаждений (Буйволова и др., 2017; Литвиненко, Кузнецов, 2020).

Цель исследования – изучение флористического разнообразия и структуры живого напочвенного покрова в сосновых насаждениях, находящихся на территории ПИП «Кузьминки-Люблино». Для ее достижения были определены следующие задачи:

- определить видовой состав, общее проективное покрытие и обилие ЖНП для каждой пробной площади;
- проанализировать распределение ЖНП по эколого-ценотическим группам.

Методы и материалы исследования

Флористический состав изучался на примере 5 постоянных пробных площадей (ППП), равномерно расположенных на территории природно-исторического парка «Кузьминки-Люблино» в разных его областях. Размер каждой ППП – 0.3 га. Преобладающей породой на всех ППП является сосна

обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), занимающая от 6 до 10 единиц в составе первого яруса. Возраст главной породы на пробных площадях варьирует от 85 до 118 лет (табл. 1).

Таблица 1. Таксационное описание ППП на изучаемом объекте

Table 1. Taxation description of permanent observation plots at study sites

№	Ярус	Состав	Возраст главной породы, лет	Среднее значение		Полнота, отн.	Запас, м ³ /га
				Высота, м	Диаметр, см		
1	I	8С2Лп+Б	106	26.1	34.3	1.04	491
	II	8Лп1Д1Кло		14.3	12.6	0.10	19
4	I	6С4Б+Д	90	24.8	39.1	0.91	362
	II	4Б4Д1Кло1Кля		14.0	13.1	0.09	16
7	I	10С+Б	85	25.3	41.6	0.69	347
	II	7Кло2С1Кля+Б		16.6	16.8	0.15	38
12	I	7С2Б1Лп+Кло+В	118	23.7	39.0	0.91	338
	II	9Кло1Лп		14.4	12.0	0.09	15
14	I	9С1Б+Лп	101	24.5	33.8	0.91	403
	II	8Кло1Кля1Лп		16.2	13.1	0.12	23

Примечание: С – *Pinus sylvestris* L., Лп – *Tilia cordata* Mill., Б – *Betula pendula* Roth, Д – *Quercus robur* L., Кло – *Acer platanoides* L., Кля – *Acer negundo* L., В – *Ulmus laevis* Pall.

На ППП были проведены полевые работы, включающие в себя сплошной пересчет древостоев с измерением диаметра ствола на высоте 1.3 м, измерением высот с помощью высотомера, определением категорий санитарного состояния деревьев. В дальнейшем были определены такие таксационные показатели древостоя, как породный состав, запас и средние значения диаметров и высот. Тип леса на изучаемой территории – сосняк сложный, тип лесорастительных условий – С₂ (свежие субори), бонитет I-III.

Основное внимание при проведении полевых работ было уделено описанию живого напочвенного покрова. На всех ППП для него определялись флористический состав и обилие видов, а также площадь проективного покрытия, как общая, так и для каждого вида в отдельности, с использованием шкалы обилия Друде. В дальнейшем был составлен общий список видов, встреченных на ППП, после чего было произведено их распределение по эколого-ценотическим группам (ЭЦГ), с использованием классификации, предложенной в книге «Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность, книга 1» (Смирнова и др., 2004). Определение адвентивных видов происходило по книге «Адвентивная флора Москвы и Московской области» (Майоров и др., 2012). Таксономические принадлежности видов, а также их названия были определены по книге «Флора средней полосы европейской части России» (Маевский, 2014).

Результаты

На территории объекта исследований в составе ЖНП было обнаружено 57 видов сосудистых растений, относящихся к 50 родам из 28 семейств. Среди наиболее представленных семейств можно выделить *Lamiaceae*, *Asteraceae*, *Poaceae* и *Rosaceae*, составляющие 12.3%, 10.5%, 8.8% и 7% от общего числа видов соответственно. Остальные семейства имеют долю от 1.8% до 5.3%. Семейством с наибольшим числом отмеченных видов и родов – 7, по 1 виду в каждом, является *Lamiaceae* (табл. 2).

Общая площадь проективного покрытия ЖНП на пробных площадях варьирует от 75% на ППП-12 и ППП-14, до 95% на ППП-7.

Таблица 2. Флористический состав ЖНП на пробных площадях

Table 2. Floristic composition of the living ground cover at the research site

№	Семейство	Род	Число видов	Встречаемость, %
1	<i>Lamiaceae</i>	<i>Ajuga</i>	1	60
		<i>Betonica</i>	1	40
		<i>Clinopodium</i>	1	20
		<i>Galeopsis</i>	1	20
		<i>Glechoma</i>	1	80
		<i>Lamium</i>	1	40
		<i>Prunella</i>	1	40
2	<i>Asteraceae</i>	<i>Arctium</i>	2	20
		<i>Carduus</i>	1	20
		<i>Mycelis</i>	1	80
		<i>Solidago</i>	1	40
		<i>Taraxacum</i>	1	20
3	<i>Poaceae</i>	<i>Brachypodium</i>	1	40
		<i>Bromus</i>	1	20
		<i>Calamagrostis</i>	1	40
		<i>Festuca</i>	1	20
		<i>Poa</i>	1	20
4	<i>Rosaceae</i>	<i>Fragaria</i>	1	100
		<i>Geum</i>	1	100
		<i>Rubus</i>	2	100
5	<i>Apiaceae</i>	<i>Aegopodium</i>	1	60
		<i>Angelica</i>	1	20
		<i>Anthriscus</i>	1	60
6	<i>Cyperaceae</i>	<i>Carex</i>	3	100
7	<i>Balsaminaceae</i>	<i>Impatiens</i>	2	100

№	Семейство	Род	Число видов	Встречаемость, %
8	<i>Caryophyllaceae</i>	<i>Stellaria</i>	2	80
9	<i>Brassicaceae</i>	<i>Alliaria</i>	1	60
		<i>Cardamine</i>	1	40
10	<i>Convallariaceae</i>	<i>Convallaria</i>	1	100
		<i>Polygonatum</i>	1	60
11	<i>Dryopteridaceae</i>	<i>Dryopteris</i>	2	80
12	<i>Polygonaceae</i>	<i>Reynoutria</i>	1	20
		<i>Rumex</i>	1	40
13	<i>Primulaceae</i>	<i>Lysimachia</i>	1	40
		<i>Trientalis</i>	1	20
14	<i>Aristolochiaceae</i>	<i>Asarum</i>	1	40
15	<i>Ericaceae</i>	<i>Vaccinium</i>	1	60
16	<i>Geraniaceae</i>	<i>Geranium</i>	1	20
17	<i>Juncaceae</i>	<i>Luzula</i>	1	80
18	<i>Oxalidaceae</i>	<i>Oxalis</i>	1	60
19	<i>Papaveraceae</i>	<i>Chelidonium</i>	1	100
20	<i>Plantaginaceae</i>	<i>Plantago</i>	1	20
21	<i>Ranunculaceae</i>	<i>Ranunculus</i>	1	60
22	<i>Rubiaceae</i>	<i>Galium</i>	1	40
23	<i>Scrophulariaceae</i>	<i>Veronica</i>	1	40
24	<i>Solanaceae</i>	<i>Solanum</i>	1	40
25	<i>Urticaceae</i>	<i>Urtica</i>	1	100
26	<i>Violaceae</i>	<i>Viola</i>	1	20
27	<i>Vitaceae</i>	<i>Parthenocissus</i>	1	20
28	<i>Woodsiaceae</i>	<i>Athyrium</i>	1	100
Итого			57	

Наиболее встречаемыми на объектах исследования оказались такие виды сосудистых растений, как *Athyrium filix-femina* (L.) Roth ex Mert., *Chelidonium majus* L., *Convallaria majalis* L., *Fragaria vesca* L., *Geum urbanum* L., *Impatiens parviflora* DC и *Rubus idaeus* L., обнаруженные на всех 5 пробных площадях. К видам с наибольшей площадью проективного покрытия можно отнести *Impatiens parviflora* DC – 86% на ППП-1 и 36% на ППП-12, *Carex pilosa* Scop. – 75% на ППП-7 и *Convallaria majalis* L. – 42% на ППП-12. Доля участия остальных видов не превышает 15% от проективного покрытия пробной площади.

В ходе исследования было обнаружено 3 вида адвентивных растений – *Impatiens parviflora* DC, *Parthenocissus inserta* (A. Kern.) Fritsch и *Reynoutria ×bohemica* Chrtek & Chrtková (Виноградова и др., 2010; Майоров и др., 2012).

При этом, первый вид, как упоминалось выше, является одним из наиболее распространенных на объекте исследования, тогда как остальные из числа инвазивных видов были встречены единично на ППП-7. Стоит отметить, что *I. parviflora* способна активно вытеснять аборигенные виды травянистых растений из мест их естественного произрастания, что хорошо видно на примере ППП-1, а также влиять на естественное возобновление древесно-кустарниковых пород (Прохоров, 2020; Schmitz, 1998).

Помимо исследования флористического разнообразия, было произведено распределение произрастающих на пробных площадях видов сосудистых растений по эколого-ценотическим группам (рис. 1). В настоящее время данная классификация весьма часто применяется для широкой оценки структурного разнообразия живого напочвенного покрова (Смирнова и др., 2004).

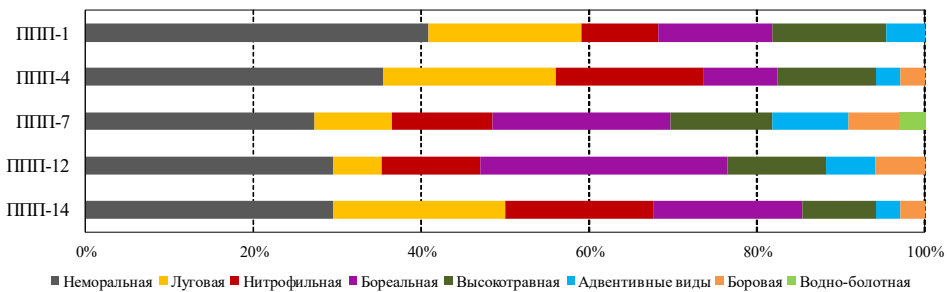


Рисунок 1. Долевое распределение ЖНП на пробных площадях по эколого-ценотическим группам

Figure 1. The share distribution of the living ground cover on the observation plots by ecological-coenotic groups

Наиболее представленной ЭЦГ на территории объекта исследования, как в целом, так и на подавляющем большинстве ППП, является неморальная (28.1%). Помимо нее, значительную долю видов составляют луговая (19.3%), нитрофильная (17.5%) и бореальная (14.0%) ЭЦГ. Последняя, в частности, составляет равную долю по сравнению с неморальной ЭЦГ на ППП-12, и близкую к ней на ППП-7. Менее распространены растения из высототравной (10.5%) и боровой (3.5%) групп, а также уже упомянутые ранее адвентивные виды (5.3%). Водно-болотная группа (1.8%) представлена одним видом – *Poa trivialis* L., обнаруженным на ППП-7.

В целом, преобладание на объекте исследования сосудистых растений, относящихся к неморальной ЭЦГ, может говорить о идущем в сосновых насаждениях ПИП «Кузьминки-Люблино» процессе неморализации, помимо территории объекта исследования наблюдающемся на ряде других лесопарковых территорий г. Москвы (Киселева и др., 2014; Лежнев, Меняева, 2023). В то же время, наличие в составе ЖНП нетипичных для лесных сообществ видов, таких, как *Arctium lappa* L., *Carduus crispus* L., *Plantago major* L., *Taraxacum officinale* F.H. Wigg и прочих, наряду с адвентивными видами, свидетельствует о том, что данные растительные сообщества подвержены антропогенному воздействию.

Выводы

В ходе исследования в сосняках природно-исторического парка «Кузьминки-Люблино» было обнаружено 57 видов сосудистых растений, принадлежащих к 28 семействам. Среди наиболее представленных семейств – *Lamiaceae*, *Asteraceae*, *Poaceae*.

Площадь проективного покрытия ЖНП на пробных площадях довольно высокая (до 95% на ППП-7). Самые представленные на них виды травянистых растений – *Impatiens parviflora* DC, *Convallaria majalis* L., *Geum urbanum* L., *Rubus idaeus* L. и др.

Наиболее широко на пробных площадях представлена неморальная эколого-ценотическая группа, что свидетельствует о проходящих в данных фитоценозах процессах неморализации. Большинство видов, встреченных на объекте исследования, характерны для природной зоны хвойно-широколиственных лесов, однако немалая их доля принадлежит к луговой ЭЦГ. Ряд относящихся к ней рудеральных видов, таких, как *Arctium lappa* L., *Taraxacum officinale* F.H. Wigg, и др. является нетипичным для лесных сообществ. Помимо этого, на территории объекта исследований отмечено произрастание 3 адвентивных видов. Учитывая это, можно утверждать о нарушении и подверженности данного фитоценоза антропогенному воздействию.

Список литературы

Андреев, Г.А., Шаповал, В.О. (2025) Анализ видового разнообразия живого напочвенного покрова ГАУК г. Москвы «ГМЗ Кузьминки-Люблино», *Актуальные исследования*, № 20-2(255), с. 6-8.

Буйволова, А.Ю., Буйволов, Ю.А., Быкова, Е.П. (2017) Опыт применения методологии сравнения показателей экосистем ООПТ урбанизированных территорий с показателями природных региональных эталонов, *Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях, Материалы VII Международной научной конференции (памяти проф. Петина А.Н.)*, Белгород, 24-26 октября 2017 года, Белгород, Издательство «ПОЛИТЕРРА», с. 397-402.

Виноградова, Ю.К., Майоров, С.Р., Хорун, Л.В. (2010) *Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России*, Москва, Издательство ГЕОС, 503 с.

Киселева, В.В., Седова, А.О., Карпухина, Н.В. (2014) Неморализация лесных биоценозов национального парка "Лосинный остров", *Актуальные проблемы экологии и природопользования: Сборник научных трудов*, Москва, 10-12 апреля 2014 года, вып. 16, Москва, Российский университет дружбы народов, с. 60-64.

Коротков, С.А., Лежнев, Д.В., Фейзрахманов, А.Р. (2024) Индикационная роль живого напочвенного покрова сосновых лесов в урбанизированной

среде, *Труды НОЦ – Ботанический сад МГУ: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*, Москва, Издательство Московского университета, с. 150-158.

Лебедев, А.В., Гостев, В.В. (2023) Анализ адвентивной флоры лесной опытной дачи Тимирязевской академии, *Экология и природопользование: тенденции, модели, прогнозы, прикладные аспекты, Материалы Национальной научно-практической конференции, Рязань, 16 апреля 2023 года*, Рязань, Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, с. 143-147.

Лежнев, Д.В. (2023) Видовой состав и структура живого напочвенного покрова в сосновых фитоценозах Лесной опытной дачи Тимирязевской академии, *Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева: сборник статей*, Москва, РГАУ-МСХА, с. 59-63.

Лежнев, Д.В., Меняева, В.А. (2023), Живой напочвенный покров сосновых фитоценозов Яузского лесопарка "Лосинового острова", *Проблемы озеленения крупных городов: сборник статей XXII научно-практического форума, Москва, 29-30 августа 2023 года*, Москва, ООО "МК-ИНТЕРТРЕЙД", ООО "ИНТЕК", с. 113-118.

Лежнев, Д.В., Меняева, В.А. (2025) Состояние живого напочвенного покрова в насаждениях *Pinus sylvestris* L. национального парка «Лосиный Остров», *Тимирязевский биологический журнал*, № 1, с. 202531104.

Лежнев, Д.В., Меняева, В.А. (2024) Эколо-фитоценотический анализ травяно-кустарничкового яруса в сосновых лесах национального парка "Лосиный Остров", *Природоподобные растительные сообщества в городе: от теории к практике: Сборник статей научно-практического симпозиума*, Москва, ООО "Эксперт-Печать", с. 52-56.

Литвиненко, В.В., Кузнецов, Е.В. (2020) Характеристика древесной растительности природно-исторического парка "Кузьминки - Люблино" по космическим снимкам, *Magyar Tudományok Journal*, № 43(43), с. 15-17.

Маевский, П. Ф. *Флора средней полосы европейской части России*, учебное пособие для биологических факультетов университетов, педагогических и сельскохозяйственных вузов, 11-е издание, Москва, Общество с ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК, 635 с.

Майоров, С.Р., Бочкин, В.Д., Насимович, Ю.А., Щербаков, А.В. (2012) *Адвентивная флора Москвы и Московской области*, Москва, Товарищество научных изданий КМК, 532 с.

Мелехов, И.С. (1980) *Лесоведение*, учебник, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 408 с.

Морозов, Г.Ф. (1930) *Учение о лесе*, под ред. В. В. Матренинского, 5-е изд., Москва, Государственное издательство, Ленинград, 440 с.

Обыденников, В.И., Титов, А.П., Ефимова, Е.В. (2005) Состояние нижних ярусов рекреационных лесов НП "Лосиный остров", *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник*, № 5, с. 97-101.

Полякова, Г.А., Меланхолин, П.Н. (2020) Динамика некоторых редких видов растений на избыточно увлажненных почвах Московского региона, *Лесохозяйственная информация*, № 1, с. 15-30.

Прохоров, В.Н. (2020) Инвазионный потенциал недотроги мелкоцветковой (*Impatiens parviflora* DC.), *Ботаника. Исследования*, № 49, с. 323-333.

Семенюк, О.В., Телеснина, В.М., Богатырев, Л.Г. (2023) Живой напочвенный покров и подстилки зеленых насаждений особо охраняемых природных территорий города Москвы, *Проблемы и состояние почв городских и лесных экосистем: Материалы II научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21-22 сентября 2023 года*, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, с. 29-32.

Смирнова, О.В., Ханина, Л.Г., Смирнов, В.Э. (2004) Эколого-ценотические группы в растительном покрове лесного пояса Восточной Европы, *Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность*, под редакцией О.В. Смирновой, Книга 1, Москва, с. 165-175.

Danilov, D.A., Shestakova, T.A., Shestakov, V.I., et al. (2020) The effect of living ground cover on the development of the young generation of tree species on post-agrogenic lands of the boreal zone, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*:5, Policy, Industry, Science and Education, Saint Petersburg, 16-18 июня 2020 года, Saint Petersburg, p. 012015.

Lezhnev, D., Korotkov, S., Stonozenko, L., Popova, A. (2024) The Growing Dynamic of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stands in the Moscow Region, *III International Conference "Sustainable Development: Agriculture, Energy and Ecology" (VMAEE-III-2024). AIP Conference Proceedings*, vol. 3184, p. 20045.

Schmitz, G. (1998) Plant Invasions: Ecological Mechanisms and Human Responses, *Leiden: Backhuys Publishers*, pp. 335-345.

References

Andreev, G.A., Shapoval, V.O. (2025) Analiz vidovogo raznoobraziya zhivogo napochvennogo pokrova GAUK G. Moskvyy «GMZ Kuz'minki-Lyublino» [Analysis of the species diversity of the living ground cover of the Moscow GMZ Kuzminki-Lyublino], *Aktual'nyye issledovaniya* [Current research], no. 20-2(255), pp. 6-8.

Bujvolova, A. Yu., Bujvolov, Yu.A., Bykova, E.P. (2017) Opyt primeneniya metodologii sravneniya pokazatelej ekosistem OOPT urbanizirovannyh territorij s pokazatelyami prirodnih regional'nyh etalonov [Experience in applying the methodology for comparing ecosystem indicators of protected areas in urbanized

areas with indicators of natural regional standards], *Problemy prirodopol'zovaniya i ekologicheskaya situatsiya v Yevropeyskoy Rossii i na sopredel'nykh territoriyakh, Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (pamyati prof. Petina A.N.), Belgorod, 24-26 oktyabrya 2017 goda* [Problems of nature management and the ecological situation in European Russia and adjacent territories, Proceedings of the VII International Scientific Conference (in memory of Prof. Petina A.N.), Belgorod, October 24-26, 2017], POLYTERRA Publishing House, Belgorod, Russia, pp. 397-402.

Vinogradova, Yu.K., Majorov, S.R., Horun, L.V. (2010) *Chernaya kniga flory Srednej Rossii: chuzherodnye vidy rastenij v ekosistemah Srednej Rossii* [The Black Book of the Flora of Central Russia: alien plant species in the ecosystems of Central Russia], GEOS Publishing House, Moscow, Russia, 503 p.

Kiseleva, V.V., Sedova, A.O., Karpuhina, N.V. (2014) Nemoralizaciya lesnyh biocenozov nacional'nogo parka "Losinyj ostrov" [Nemoralization of forest biocenoses of the Losiny Ostrov National Park], *Aktual'nyye problemy ekologii i prirodopol'zovaniya: Sbornik nauchnykh trudov, Moskva, 10-12 aprelya 2014 goda* [Actual problems of ecology and nature management: Collection of scientific papers, Moscow, April 10-12, 2014], issue 16, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia, pp. 60-64.

Korotkov, S.A., Lezhnev, D.V., Fejzrahmanov, A.R. (2024) Indikacionnaya rol' zhivogo napochvennogo pokrova osnovnykh lesov v urbanizirovannoj srede [The indicative role of the living ground cover of pine forests in an urbanized environment], *Trudy NOTS – Botanicheskij sad MGU: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Proceedings of the REC – Botanical Garden of Moscow State University: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation], Moscow University Press, Moscow, Russia, pp. 150-158.

Lebedev, A.V., Gostev, V.V. (2023) Analiz adventivnoj flory lesnoj opytnoj dachi Timiryazevskoj akademii [Analysis of the adventitious flora of the Timiryazev Academy experimental forest cottage], *Ekologiya i prirodopol'zovaniye: tendentsii, modeli, prognozy, prikladnyye aspekty, Materialy Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Ryazan', 16 aprelya 2023 goda* [Ecology and nature management: trends, models, forecasts, applied aspects, Proceedings of the National Scientific and Practical Conference, Ryazan, April 16, 2023], Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia, pp. 143-147.

Lezhnev, D.V. (2023) Vidovoj sostav i struktura zhivogo napochvennogo pokrova v osnovnykh fitocenzakh Lesnoj opytnoj dachi Timiryazevskoj akademii [Species composition and structure of living ground cover in pine phytocenoses of the Forest experimental cottage of the Timiryazev Academy], *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya molodyh uchyonyh i specialistov, posvyashchyonnaya 180-letiyu so dnya rozhdeniya K.A. Timiryazeva: sbornik statej* [International Scientific Conference of Young Scientists and specialists dedicated to the 180th

anniversary of the birth of K.A. Timiryazev: collection of articles], RGAU-MSHA, Moscow, Russia, pp. 59-63.

Lezhnev, D.V., Menyaeva, V.A. (2023), Zhivoj napochvennyj pokrov sosnovykh fitocенозов Yauzskogo lesoparka "Losinogo ostrova" [Living ground cover of pine phytocenoses of the Yauzsky Forest Park "Losiny Ostrov"], *Problemy ozeleneniya krupnykh gorodov: sbornik statej XXII nauchno-prakticheskogo foruma, Moskva, 29-30 avgusta 2023 goda* [Problems of greening large cities: collection of articles of the XXII Scientific and Practical Forum, Moscow, August 29-30, 2023], MK-INTERTRADE LLC, INTEK LLC, Moscow, Russia, pp. 113-118.

Lezhnev, D.V., Menyaeva, V.A. (2025) Sostoyanie zhivogo napochvennogo pokrova v nasazhdeniyakh Pinus sylvestris L. nacional'nogo parka «Losinyj Ostrov» [The state of living ground cover in Pinus sylvestris L. plantations of the Losiny Ostrov National Park], *Timiryazevskij biologicheskij zhurnal* [Timiryazevsky Biological Journal], no. 1, p. 202531104.

Lezhnev, D.V., Menyaeva, V.A. (2024) Ekologo-fitocенотический анализ травяно-кустарничкового яруса в сосновых лесах национального парка "Losinyj Ostrov" [Ecological and phytocenotic analysis of the grass and shrub layer in the pine forests of the Losiny Ostrov National Park], *Prirodopodobnye rastitel'nye soobshchestva v gorode: ot teorii k praktike: Sbornik statej nauchno-prakticheskogo simpoziuma* [Nature-like plant communities in the city: from theory to practice: A collection of articles from a scientific and practical symposium], Expert-Print LLC, Moscow, Russia, pp. 52-56.

Litvinenko, V.V., Kuznecov E.V. (2020) Harakteristika drevesnoj rastitel'nosti prirodno-istoricheskogo parka "Kuz'minki – Lyublino" po kosmicheskim snimkam, [Characteristics of the woody vegetation of the Kuzminki – Lyublino Natural Historical Park based on satellite images], *Magyar Tudomanyos Journal*, no. 43(43), pp. 15-17.

Maevskij, P. F. *Flora srednej polosy evropejskoj chasti Rossii : uchebnoe posobie dlya biologicheskikh fakul'tetov universitetov, pedagogicheskikh i sel'skohozyajstvennykh vuzov, 11-e izdanie* [Flora of the Middle zone of the European part of Russia: a textbook for biological faculties of universities, pedagogical and agricultural universities, 11th edition], Limited Liability Company Association of Scientific Publications of the KMK, Moscow, Russia, 635 p.

Majorov S.R., Bochkina V.D., Nasimovich Yu.A., Shcherbakov A.V. (2012) *Adventivnaya flora Moskvy i Moskovskoj oblasti* [Adventitious flora of Moscow and the Moscow region], Association of Scientific Publications of the KMK, Moscow, Russia, 532 p.

Melekhov, I.S. (1980) *Lesovedenie, uchebnik* [Forestry, textbook], Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, 408 p.

Morozov G.F. (1930) *Uchenie o lese* [The Doctrine of the Forest], in V.V. Matreninsky (ed.), 5th ed., State Publishing House, Moscow, Leningrad, Russia, 440 p.

Obydennikov, V.I., Titov A.P., Efimova E.V. (2005) Sostoyanie nizhnih yarusov rekreacionnyh lesov NP "Losinyj ostrov" [The state of the lower tiers of recreational forests of the NP "Losiny Ostrov"], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik* [Bulletin of the Moscow State University of Forests – Lesnoj Vestnik], no. 5, pp. 97-101.

Polyakova, G.A., Melanholin P.N. (2020) Dinamika nekotoryh redkih vidov rastenij na izbytochno uvlazhennyyh pochvah Moskovskogo regiona [Dynamics of some rare plant species on excessively moistened soils of the Moscow region], *Lesohozyajstvennaya informaciya* [Forestry Information], no. 1, pp. 15-30.

Prohorov, V.N. (2020) Invazionnyj potencial nedotrogi melkocvetkovoj (*Impatiens parviflora* DC.) [The invasive potential of the small-flowered nedotroga (*Impatiens parviflora* DC.)], *Botanika. Issledovaniya* [Botany. Researches], no. 49, pp. 323-333.

Semenyuk, O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G. (2023) Zhivoj napochvennyj pokrov i podstilki zelenyh nasazhdenij osobo ohranyaemyh prirodnyh territorij goroda Moskvy, [Living ground cover and litter of green spaces of specially protected natural territories of the city of Moscow], *Problemy i sostoyanie pochv gorodskih i lesnyh ekosistem: Materialy II nauchno-prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 21-22 sentyabrya 2023 goda* [Problems and condition of soils of urban and forest ecosystems: Proceedings of the II scientific and practical conference, St. Petersburg, September 21-22, 2023], St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, St. Petersburg, Russia, pp. 29-32.

Smirnova, O.V., Hanina L.G., Smirnov V.E. (2004) Ekologo-cenoticheskie gruppy v rastitel'nom pokrove lesnogo poyasa Vostochnoj Evropy, Vostochnoevropejskie lesa: istoriya v golocene i sovremennost' [Ecological and cenotic groups in the vegetation cover of the forest belt of Eastern Europe], *Vostochnoevropejskie lesa: istoriya v golocene i sovremennost'* [Eastern European Forests: History in the Holocene and Modernity], in O.V. Smirnova (ed.) Russia, 165-175.

Danilov, D.A., Shestakova, T.A., Shestakov, V.I., et al. (2020) The effect of living ground cover on the development of the young generation of tree species on post-agrogenic lands of the boreal zone, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science:5, Policy, Industry, Science and Education, Saint Petersburg, 16-18 июня 2020 года*, Saint Petersburg, p. 012015.

Lezhnev, D., Korotkov, S., Stonozenko, L., Popova, A. (2024) The Growing Dynamic of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stands in the Moscow Region, *III International Conference "Sustainable Development: Agriculture, Energy and Ecology" (VMAEE-III-2024). AIP Conference Proceedings*, vol. 3184, p. 20045.

Schmitz, G. (1998) Plant Invasions: Ecological Mechanisms and Human Responses, *Leiden: Backhuys Publishers*, pp. 335-345.

Поступила в редакцию: 15.10.2025.

Доработана после рецензирования: 16.07.2025.

Для цитирования / For citation:

Коротков, С.А., Лежнев, Д.В., Фейзрахманов, А.Р., Кривошапов, Н.Ф. (2025) Флористическое разнообразие живого напочвенного покрова в сосняках природно-исторического парка «Кузьминки-Люблино», *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVI, № 3-4, с. 119-132, doi:10.24412/2782-3237-2025-3-4-119-132.

Korotkov, S.A., Lezhnev, D.V., Feizrakhmanov, A.R., Krivoschapov, N.F. (2025) Floristic diversity of living ground cover in the pine forests of the Kuzminki-Lyublino natural historical park, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVI, no. 3-4, pp. 119-132, doi:10.24412/2782-3237-2025-3-4-119-132.

Роль частного коэффициента корреляции в статистических выводах

Макимова О.В.^{1,2)}

¹⁾ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾Университет МИСИС,
Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4

*Адрес для переписки: o-maximova@yandex.ru

Реферат. В работе разобраны ситуации, когда расчет частных коэффициентов корреляции становится оправданным и может привести к выводам, не совпадающим с первоначальными на этапе расчета обычных коэффициентов корреляции Пирсона. Частные корреляции позволяют выделить значимые факторы в условиях их коллинеарности, а также сделать отбор предикторов для построения наилучшей регрессионной модели. Особое внимание уделено графической интерпретации и вопросам проверки значимости частного коэффициента корреляции в условиях негауссовых выборок. Продемонстрированы примеры как модельных, так и натуральных данных, когда применение частных корреляций позволило принять обоснованные решения о причинно-следственных связях.

Ключевые слова. Частный коэффициент корреляции, коэффициент корреляции Пирсона, ложные корреляции, коллинеарные признаки, факторный анализ, ридж-регрессия.

The role of the partial correlation coefficient in statistical inference

O.V. Maksimova^{1), 2)}

¹⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russian Federation

²⁾ University of Science and Technology (MISIS),
4, Leninsky pr., Moscow, 119049, Russian Federation

*Correspondence address: o-maximova@yandex.ru

Abstract. The paper analyzes situations when the calculation of partial correlation coefficients becomes justified and can lead to conclusions that do not coincide with the initial ones at the stage of calculating the usual Pearson correlation coefficients. Partial correlations allow identifying significant factors in conditions of their collinearity, as well as selecting predictors to build the best regression model. Particular attention is paid to graphical interpretation and issues

of checking the significance of the partial correlation coefficient in conditions of non-Gaussian samples. Examples of both model and field data are shown where the use of partial correlations allowed making informed decisions about cause-and-effect relationships.

Keywords. Partial correlation coefficient, Pearson correlation coefficient, spurious correlations, collinear factors, factor analysis, ridge-regression.

*Хотя мы часто слышим, что данные говорят сами за себя,
их голос может быть тихим и вкрадчивым.*

*Mosteller F., Fienberg S.E., Rourke R.E.
«Beginning Statistics with Data Analysis»*

Введение

Термин «корреляция» был введен в статистическую науку выдающимся английским ученым Ф. Гальтоном¹⁾ в 1886 г. Однако точную расчетную формулу разработал его ученик Карл Пирсон, чьим именем и назван один из самых известных коэффициентов корреляции. Первые упоминания о существовании случаев, в которых интерпретация коэффициента корреляции оказывалась некорректной, появились в статье британского статистика Джорджа Юла в 1895 г., работу над которой он начал совместно с Карлом Пирсоном (Yule, 1895). Юл интересовался применением статистических методов к социальным проблемам, и эта первая статья была посвящена выявлению корреляции бедности (пауперизма) с долей жителей, получающих пособие. Он обратил внимание, что имеется очень высокая положительная связь между долей пособий по безработице и пауперизмом в сельской местности. Казалось бы, полученную связь можно обобщить для любой территории проживания. Но при исследовании городского населения такая связь не нашла подтверждения. Оказалось, что сила и направленность полученных связей зависела от места проживания; корреляция не могла быть обобщена и рассчитана для объединенной выборки, так как место жительства как третий фактор оказывало влияние по-разному на оба параметра (пауперизм и доля получающих пособие). Исходя из множества собственных наблюдений, Юл заключил, что требуется уделять особое внимание тщательному сбору данных и их группировке, особо подчеркивая необходимость удаления выбросов. Как известно, одно ошибочное наблюдение может разрушить все статистическое исследование, сколько бы ни было в наличии наблюдений, например: «... достаточно, чтобы только один из 701 индивида не подчинился господствующему закону пропорциональности $Y = 0.1X$, чтобы коэффициент корреляции

¹⁾ <https://galton.org/statistician.html> (дата обращения 02.06.2025)

понижился до значения 0.198» (Бернштейн, 1932). Однако, отметим, что не всегда выбросы представляют собой ошибочные наблюдения, а, напротив, они могут скрывать много полезной информации о рассматриваемой совокупности, и поэтому требуют также тщательного изучения (Максимова, 2024).

Юл считал, что большая корреляция может быть иллюзорна и вызвана действием некоторого стороннего фактора (переменной): если первая переменная коррелирует с двумя другими, то сами эти две переменные также будут связаны, причем эта связь наблюдается под действием первой (Yule, 1895). Для выявления «чистой» взаимосвязи, как назвал ее в своих работах Юл, требуется устранить влияние общего фактора. Для этого, позднее, в 1897 г., он в своей работе предложил формулу расчета показателя «чистой» связи между двумя переменными при устранении влияния остальных (формула была представлена для трех и четырех изначально рассматриваемых переменных). Название «частная корреляция» впервые использовано Юлом в работе 1907 г., где он распространил введенные формулы на любое число переменных (Yule, 1907). Одно из первых строгих доказательств предложенной Юлом расчетной формулы для общего случая представлено в том же году С. Спирменом в американском журнале по психологии (Spearman, 1907).

Юл отмечал, что в результате применения частной корреляции может даже случиться, что обычная первоначальная положительная связь превратится в явно отрицательную, или наоборот. Из этого он сделал вывод, что данные надо тщательно проверять на наличие действий неких других факторов во избежание неверных интерпретаций. Многие сделанные Юлом работы указывают на то, что отсутствие учета других факторов (но тех, которые действительно могут иметь причинные взаимосвязи) может исказить корреляцию между интересующими нас переменными, и может не позволить сделать корректное обоснование причинно-следственных связей, если они существуют. Позднее, в 1920-1930 гг. Юл в своих статьях ввел понятие коррелограммы, а также исследовал корреляцию во временных рядах и написал фундаментальные работы по авторегрессии.

Становится понятным, что частные коэффициенты корреляции необходимы для выявления «чистых» связей между переменными и применяются не только в промежуточном, но и самостоятельном этапах статистического исследования. Еще в начале XX в. Уильям Госсет применял частные коэффициенты корреляции в сельскохозяйственных экспериментах с целью устранения влияния временной компоненты для выявления «чистой» связи между наблюдениями за растениями во времени (Pearson et al., 1990). Применение частной корреляции актуально в задачах выявления «чистых» связей и в наши дни: например, в экологических исследованиях при оценке влияния загрязнения и климатических факторов на параметры состояния крон деревьев (Шерстнева и др., 2024), для улучшения эффективности повышения тренировочного процесса и разработки плана спортивных тренировок (Алаев, Осетров, 2010), для решения отдельных задач селекции животных (Горлов и др., 2009), в здравоохранении при оценке воздействия возбудителей инфекции на здоровье (Сметанина и др., 2012), в экономических исследованиях (Сидор-

чукова и др., 2022) и во многих др. Сохранившаяся актуальность этого инструмента обусловлена тем, что клубок взаимосвязей изучаемых признаков в практических задачах часто велик и запутан.

Частный коэффициент корреляции, так же, как и обычный, по своей структуре и идее происхождения достаточно прост. Но не смотря на кажущуюся простоту, его более детальное изучение открывает ряд возможностей не только в понимании природы закономерностей, но и позволяет осознать его ограниченные возможности (что также крайне важно для исследователя). Как отмечал математик Ж. А. Пуанкаре «Простота – единственная почва, на которой мы можем воздвигнуть здание наших обобщений... видимая простота на самом деле таит в себе чрезвычайную сложность»²⁾.

Цель исследования: выявить и описать математически ситуации (а также условия и ограничения), в которых применение частных коэффициентов корреляции целесообразно; привести примеры прикладных исследований, в которых расчет частных коэффициентов корреляции помог принять обоснованные выводы о причинно-следственных связях.

Методы и материалы

Квадрат частного коэффициента корреляции для правильной интерпретации можно определить в общем виде через отношение сокращения остаточной вариации за счет дополнительного включения в линейную модель связи нового фактора (x_i) к остаточной вариации до введения этого дополнительного фактора/факторов:

$$r^2_{z x_1 / x_2 \dots x_{i-1}} = \frac{Q_{\text{ост. без } x_i} - Q_{\text{ост. без } x_i}}{Q_{\text{ост. без } x_i}} = 1 - \frac{Q_{\text{ост. без } x_i}}{Q_{\text{ост. без } x_i} + Q_{\text{общ}}} = 1 - \frac{1 - R^2_{z x_i}}{1 - R^2_{\text{без } x_i}} = \frac{R^2_{z x_i} - R^2_{\text{без } x_i}}{1 - R^2_{\text{без } x_i}}, \quad (1)$$

где:

$r^2_{z x_i / x_1 \dots x_{i-1}}$ – квадрат частной корреляции z с x_i при устранении влияния x_1, \dots, x_{i-1} ;

$Q_{\text{ост. с } x_i} / Q_{\text{ост. без } x_i}$ и $R^2_{\text{с } x_i} / R^2_{\text{без } x_i}$ – остаточные суммы квадратов и коэффициенты детерминации между значениями зависимости, включающей все переменные/кроме x_i , и наблюдаемыми значениями z ;

$Q_{\text{общ}}$ – сумма квадратов между наблюдаемыми значениями z и средним. Таким образом, чем больше доля сокращения остаточной вариации за счет введения интересующего фактора x_i , тем теснее между x_i и z связь.

Для трехмерной линейной формы связи $z = z(x_1, x_2)$ формулу (1) для частного коэффициента корреляции (ЧКК) «чистой» взаимосвязи z с x_1 при устранении влияния x_2 можно представить в виде

²⁾ Пуанкаре Ж. А. Теорема века. Мир с точки зрения математики, М., Родина, 2020, 448 с.

$$r_{zx_1/x_2} = \frac{r_{zx_1} - r_{x_1x_2} \cdot r_{zx_2}}{\sqrt{(1 - r_{zx_2}^2) \cdot (1 - r_{x_1x_2}^2)}}, \quad (2)$$

где через $r_{..}$ обозначены коэффициенты корреляции Пирсона.

Значимость частного коэффициента корреляции проверяется как и для обычного коэффициента корреляции по критерию Стьюдента, но с $(n - p)$ числом степеней свободы, где n – объем выборки, p – число параметров линейной формы связи $z = z(x_1, \dots, x_n)$ (Кобзарь, 2012). Условия такой проверки предполагают, что выборки сделаны из нормального закона распределения («тонкие» моменты статистической проверки значимости более детально будут рассмотрены далее).

Помимо модельных примеров в работе использовались результаты исследований автора и данные открытого доступа с указанием соответствующих ссылок.

Результаты и обсуждение

Как отмечалось ранее, ЧКК применяются для исключения влияния «мешающего» фактора и получения «очищенного» значения коэффициента корреляции. В работе американского политолога и статистика Раммела приведен следующий пример (Rummel, 1976). Оценивалась корреляция между неграмотностью и детской смертностью. Заранее можно было предположить, что отсутствие образования означает плохой уход за детьми, что приводит к более высокой смертности. Рассчитанный коэффициент корреляции для всех стран в 1955 г. составил значение 0.61. Получаем, что неграмотность и детская смертность имеют 37% ($0.61^2 \approx 0.37$) общей дисперсии и, если не учитывать другие факторы, то можно прийти к выводу, что образование помогает предотвратить детскую смертность. Но почему же этот вывод не совсем верен? Оказалось, что эти две переменные не изолированы друг от друга, они связаны с экономическим развитием: многие жители наименее развитых стран питаются неправильно, получают недостаточное медицинское обслуживание и живут в ужасных условиях. Отсюда следует высокая детская смертность. Кроме того, из-за отсутствия или плохого качества системы образования многие люди неграмотны (Rummel, 1976).

Рассмотрим реперные вопросы, ответы на которые необходимы для понимания и правильного использования и интерпретации ЧКК в прикладных исследованиях.

Свойства и геометрическая интерпретация частного коэффициента корреляции

Коэффициент частной корреляции имеет те же свойства, что и обычный коэффициент корреляции. В статье 1907 года Джордж Юл приводит основные

его свойства и некоторые специальные случаи взаимосвязей трех переменных x_1 , x_2 и x_3 , которые могут приводить к нетривиальным результатам (Yule, 1907). Например, казалось бы, если случайная величина x_1 положительно коррелирует с x_2 ($r_{12} > 0$), а x_2 положительно коррелирует с x_3 ($r_{23} > 0$), то вполне естественно считать, что x_1 положительно коррелирует с x_3 , т.е. $r_{13} > 0$. Однако, положительный знак корреляции случайных величин x_1 и x_3 гарантирован, как отмечает Юл, лишь при ограничениях³⁾ $r_{12} > 0.707$, $r_{23} > 0.707$. Там же, Юл привел еще один интересный пример: вроде бы, «чистая» корреляция (частная) между x_1 и x_2 при нивелировании влияния x_3 будет более информативна, нежели в случае обычной корреляции между x_1 и x_2 . Однако, это действительно так только в случае, когда числитель формулы (2) не равен нулю. Пусть $r_{12} = 0.4$, $r_{13} = 0.8$, $r_{23} = 0.5$, тогда, согласно формуле (2), получаем

$$r_{2/3} = \frac{r_{12} - r_{13} \cdot r_{23}}{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)} = \frac{0.4 - 0.8 \cdot 0.5}{0.6 \sqrt{0.75}} = 0$$

Таким образом, введение переменной x_3 приводит к нулевому значению чистой корреляции между x_1 и x_2 , которая до введения составляла значение $r_{12} = 0.4$. В таком случае частная корреляция нам ничем не поможет для выявления истинной связи между x_1 и x_2 .

Эти специальные случаи перестают быть столь удивительными, если привести геометрическую интерпретацию ЧКК. Ранее в работах автора был рассмотрен геометрический смысл обычного коэффициента корреляции Пирсона, который задает косинус угла между векторами наблюдений после определенных преобразований (Максимова, 2025). Если же для трех переменных необходимо оценить «чистую» корреляцию между x и y при условии устранения воздействия переменной z , то частный коэффициент корреляции $r_{xy/z}$ также будет задаваться через косинус угла φ , но между проекциями r_X и r_Y векторов x и y соответственно на плоскость S_z , перпендикулярную z (рис. 1). К примеру, на рис. 1 заметно, что угол между векторами наблюдений x и y тупой и, соответственно $r_{xy} < 0$, однако рост z влечет увеличение в среднем x и уменьшение y , и угол между их проекциями на плоскость S_z оказывается острым, из чего следует, что $r_{xy/z} > 0$. Становится ясно, что третий фактор z оказывает влияние не только на силу «чистой» связи между x и y , но и даже на знак.

Как только становится понятной логика геометрической интерпретации при устранении воздействия третьей переменной, то легко разобраться и в многомерном случае, когда устраняется действие нескольких переменных.

³⁾Примечание автора статьи: на самом деле, строгое решение неравенства, приведенное в работе Юла 1897 г. дает точную оценку $r_{12} > 1/2$, $r_{23} > 1/2$, что как раз в приближенном варианте приводит к значению 0.707.

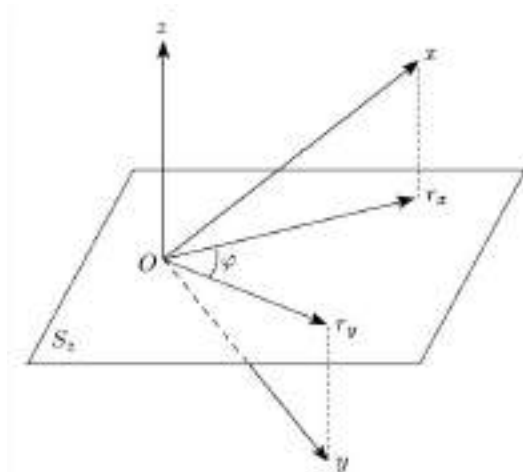


Рисунок 1. Геометрическая интерпретация частного коэффициента корреляции для случая трех переменных x , y и z

Figure 1. Geometric interpretation of the partial correlation coefficient for the case of three variables x , y and z

В обсуждавшемся выше примере из введения статистик Раммел при оценке корреляции между неграмотностью и детской смертностью получил значение 0.61 (Rummel, 1976). Однако, ЧКК при исключении влияния фактора ВВП⁴⁾ на душу населения составил значение лишь 0.13, что значительно ниже исходной корреляции. И коэффициент детерминации, отражающий процент объясненной дисперсии между переменными, резко снизился с 37% до 2 %. Таким образом, гипотеза о том, что экономическое развитие влияет на корреляцию между этими двумя переменными, безусловно, в этом примере имеет основание.

Однако нельзя забывать и всегда учитывать в исследовании, что частная корреляция наряду с обычной корреляцией не обязательно говорит о причинности существующей связи между переменными. Для выявления такой связи необходимо, в первую очередь, знать природу рассматриваемых процессов, т.е. иметь внестатистические обоснования (Pearson et al., 1990; Максимова, 2024).

Частный коэффициент корреляции и нормальность выборочных данных

Условия проверки значимости коэффициента корреляции (обычного или частной корреляции) предполагают, что выборки сделаны из нормального закона распределения. Однако, устойчивость критерия Пирсона к нарушению нормальности распределения данных обсуждалась еще в начале XX века в переписке ряда ученых: Рональда Фишера, Ульяма Госсета, Карла и Эгона

⁴⁾ ВВП – валовый национальный продукт

Пирсонов (Pearson et al., 1990). Надо отметить, что к единому мнению ученым прийти не удалось, но это не означает, что один из них все-таки прав, а остальные ошибались, так как в статистике зачастую точного общего ответа на вопрос дать невозможно и необходимо знать последствия принятого того или иного решения. В той исторической переписке Уильям Госсет отмечает, что, проведя множество натуральных экспериментов с малыми выборками на пивоварне Guinness^{5),6)} в Дублине, в экспериментальной лаборатории которой он проработал 1899 по 1937 гг., он пришел к выводу о возможности применения критерий Пирсона для распределений, относящихся к типу «улучшенной шляпы»⁷⁾ (Pearson et al., 1990). Лишь в XXI-м веке вышла статья коллектива ученых, которые проанализировали влияние ненормальности данных на устойчивость критерия Стьюдента, в которой показано, что для симметричных законов, отличающихся от нормального (более островершинных и плосковершинных), значимого изменения предельных распределений статистик не происходит (Лемешко, Помадин, 2002). В работе авторов из Санкт-Петербурга показано, что при проверке значимости ЧКК общеупотребительный классический критерий Пирсона является асимптотически точным для выборок из гауссовских распределений, а также построен более точный критерий при нарушении нормальности, однако, этот критерий может быть использован на практике только при достаточно больших объемах выборок, что может ограничивать его применение в некоторых прикладных исследованиях (Лунев, Некруткин, 2019). Указанные дополнения существенно расширяют сферу корректного применения методов корреляционного анализа в прикладных исследованиях.

Отбор факторов в линейную регрессионную модель с помощью частных коэффициентов корреляции

Процесс включения какого-либо набора факторов (предикторов, переменных) в разрабатываемую модель линейной множественной регрессии диктуется, в первую очередь, мнением исследователя-специалиста относительно природы взаимосвязи анализируемого показателя с остальными явлениями.

На стадии формирования модели часто используется процедура отсева факторов, для которой используют ЧКК. Зачем такой отсев нужен и нельзя ли строить модель со всеми имеющимися переменными? Имеется две причины в пользу процедуры отсева факторов. Во-первых, большое число включенных переменных существенно усложняет модель и ее интерпретацию, и при этом

⁵⁾ <https://www.guinness.com> (дата обращения 09.06.2025)

⁶⁾ <https://priceonomics.com/the-guinness-brewer-who-revolutionized-statistics/> (дата обращения 09.06.2025)

⁷⁾ Комментарий автора статьи: в переписке между У. Госсетом и К. Пирсоном, представленной в (Pearson et al., 1990), не приведено определение распределения типа «улучшенной шляпы», и указано лишь то, что это означает «распределение примерно нормально».

нет уверенности, что построенная модель будет обладать хорошими прогнозными свойствами. Во-вторых, иногда факторы обнаруживают взаимную тесную связь и отбор факторов с помощью качественного анализа затруднен, так как в этом случае парные коэффициенты корреляции Пирсона между зависимой переменной и факторами могут некорректно отражать взаимосвязь (Yule, 1895). Если все-таки включить в модель коллинеарные факторы, то какие последствия можно при этом ожидать?

– Во-первых, затрудняется интерпретация параметров множественной регрессии как характеристик действия факторов в «чистом» виде, так как факторы дублируют друг друга по воздействию на зависимую переменную, и коэффициенты линейной регрессии теряют смысл.

– Вторая причина состоит в том, что оценки параметров регрессии ненадежны в том смысле, что обнаруживают большие стандартные ошибки и меняются с изменением объема наблюдений (не только по величине, но могут меняться и по знаку), что делает модель непригодной для анализа и прогнозирования.

Таким образом, в условиях наличия коллинеарных факторов возникает необходимость выбора среди них наиболее тесно связанных (в математическом смысле) с зависимой переменной. Рассмотрим примеры отбора факторов в линейную регрессионную модель с применением частных коэффициентов корреляции.

Пример 1 (модельный). Исследуется возможность построения линейной регрессионной модели зависимости z от переменных x_1 , x_2 и x_3 . В результате получена корреляционная таблица 1. Наибольшую связь с переменной z имеют переменные x_1 и x_2 , однако межфакторная корреляция между ними высокая ($r_{x_1x_2} \geq 0.7$), из чего x_1 и x_2 можно признать коллинеарными. Такие факторы дублируют эффекты воздействия на переменную z и, значит, их нежелательно одновременно включать в модель. За счет коллинеарности факторов, как описано выше, искажаются их корреляционные связи с z .

Таблица 1. Таблица парных корреляций Пирсона для примера 1

Table 1. Pearson Pairwise Correlation Table for Example 1

	z	x_1	x_2	x_3
z	1			
x_1	0.8	1		
x_2	0.7	0.8	1	
x_3	0.6	0.5	0.2	1

Рассчитаем частные коэффициенты корреляции их связи с z по формуле (2):

$$r_{zx_2/x_1} = \frac{r_{zx_2} - r_{x_1x_2} \cdot r_{zx_1}}{\sqrt{(1 - r_{zx_1}^2)(1 - r_{x_1x_2}^2)}} = \frac{0.7 - 0.8 \cdot 0.8}{\sqrt{(1 - 0.49)(1 - 0.64)}} \approx 0.17,$$

$$r_{zx_1/x_2} = \frac{r_{zx_1} - r_{x_1x_2} \cdot r_{zx_2}}{\sqrt{(1 - r_{x_1x_2}^2)(1 - r_{zx_2}^2)}} = \frac{0.8 - 0.8 \cdot 0.7}{\sqrt{(1 - 0.49)(1 - 0.64)}} \approx 0.56.$$

Частная корреляция z с x_2 при исключении влияния x_1 равна $r_{zx_2/x_1} \geq 0.17$, а значит «чистая» связь x_2 с зависимой переменной z слабая. Частная корреляция z с x_2 существенно меньше обычного коэффициента корреляции $r_{zx_2} = 0.70$, что происходит из-за смещения эффектов воздействия коллинеарного с x_2 фактора x_1 (табл. 1). Частная корреляция z с x_1 составляет значение $r_{zx_1/x_2} = 0.56$ и достаточно близка к значению обычного коэффициента корреляции $r_{zx_1} = 0.80$ (табл. 1). Поэтому из двух коллинеарных факторов целесообразно в модели оставить x_1 .

Интересно отметить, что иногда отдается предпочтение включению среди коллинеарных факторов не тому, для которого ЧКК с зависимой переменной наибольший, а тому, которая более оправдан с прикладной точки зрения. Это связано с тем, что выборочный коэффициент корреляции неразрывно связан с выборкой и обладает случайностью, которая именно в условиях исследуемой выборки может оказать влияние в выстраивании предпочтений включения того или иного фактора среди коллинеарных. Таким образом, отбор факторов-регрессоров – это процесс, требующий индивидуального подхода.

Самая сложная ситуация проявляется в прикладных исследованиях тогда, когда есть необходимость включения коллинеарных факторов, и тогда требуются более «тонкие» подходы. К решению такой задачи можно подойти, по крайней мере, двумя способами:

1) с применением факторного анализа, который позволяет сделать свертку коллинеарных предикторов в факторы для дальнейшего построения модели. Снижение числа предикторов и выявление значимых факторов с помощью факторного анализа может существенно улучшить точность регрессионной модели: эти факторы будут усиливать различия между переменными, которые относятся к одному фактору, и теми, которые к нему не относятся (Дрейпер, Смит, 1987). Однако, факторный анализ не «бесплатен», он сложен с математической точки зрения и требует разностороннего и тщательного подхода к применению и интерпретации (Rummel, 1967);

2) с применением специального метода «ридж-регрессия»⁸⁾ (гребневая регрессия), которая отличается устойчивостью для случаев сильной взаимной коррелированности переменных; в методе гребневой регрессии получаемые оценки коэффициентов модели смещены, но при этом имеют меньшую дисперсию, и потому могут давать более точные и приемлемые для практического использования модели результаты (Дрейпер, Смит, 1987). Однако, на практике гребневая регрессия редко применяется в качестве процедуры выбора наилучшей модели – она очень сложна и редко оправдана.

⁸⁾ предложена Херлом в 1962 г.

Описание этих подходов выходит за пределы поставленных задач настоящего исследования. С реализацией первого подхода можно ознакомиться на примере построения модели синдрома профессионального выгорания у работников творческого коллектива (Апалькова, 2021). Для построения модели использовалась свертка признаков в качественно интерпретируемые факторы: первый фактор отражал признаки стресса, усталости и тревожности, а второй объединил в себе признаки перфекционизма. Со вторым подходом можно ознакомиться на примере построения зависимости между валовым региональным продуктом и факторами, совместно обеспечивающими этот показатель: объем экспорта, объем инвестиций и фактор качества (число систем менеджмента качества и число обучающихся в сфере СМК) (Антонова и др., 2014).

Пример 2 (на натурных данных). В работе (Горячева и др., 2025) проанализирована цена ski-pass⁹⁾ одного дня на взрослого человека среди 499 горнолыжных курортов разных стран в 2022 г. Среди множества рассматриваемых предикторов от длины трасс разной сложности до ВВП региона, который не только отражает экономическую активность, но и влияет на ценообразование через динамику спроса, предложение и инфляционные процессы (всего выделено 15 переменных), были выделены наиболее значимо влияющие на цену ski-pass неколлинеарные факторы: ВВП региона (евро), число трасс и наивысшая точка курорта (м). На основании этих факторов была построена линейная регрессионная модель оценки цены ski-pass посещения курортов, которая обладает высокой объясняющей способностью (коэффициент детерминации $R^2 = 0.69$, проверены условия теоремы Гаусса-Маркова), и которая может быть использована для оптимизации стратегий развития в данной сфере.

Выявление значимых факторов при помощи частных коэффициентов корреляции

Как отмечалось выше, ЧКК можно использовать для отсева факторов на стадии формирования линейной регрессионной модели. Но также их можно использовать самостоятельно для выявления наиболее значимых для исследуемого признака факторов, так как не всегда в исследовании ставится задача построения регрессии. Это связано с тем, что ЧКК наряду с КК характеризует синхронность изучаемых показателей, но их использование в построении модели возможно только в условиях, когда она линейна (Максимова, 2024). Однако, такая форма связи в натурных данных встречается достаточно редко. Приведем два примера применения ЧКК с целью выявления значимых факторов в разных прикладных областях исследования.

Пример 1. В работе (Шерстнева и др., 2024) проведена оценка влияния климатических и гидрологических факторов на параметры состояния крон сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Центрально-Лесного

⁹⁾ Ski-pass – это абонемент на подъемники на горнолыжных курортах

государственного природного биосферного заповедника (56°26' в.д., 56°31' с. ш). Оценивалась связь дефолиации¹⁰⁾ и депигментации¹¹⁾ сосны с температурой воздуха, осадками и уровнем вод болота Старосельский мох¹²⁾, на окраине которого произрастает сосна. Большинство полученных корреляций получились некорректными с точки зрения биологических выводов. Оказалось, что между уровнем воды в гидрографической сети (включая болото) и количеством осадков имеется значимая положительная связь $r = 0.66$, которая не позволяет дать чистую оценку каждого из этих факторов на показатели состояния кроны сосны. Осадки, накапливаясь в водоемах и водотоках, оказывают определяющее влияние на гидрологический режим территории в вегетационном сезоне. Для выявления самостоятельной связи дефолиации и депигментации сосны с климатическими и гидрологическими факторами авторы прибегли к расчету ЧКК. Наиболее интересным оказался случай корреляции значений депигментации сосны с суммарными осадками вегетационного сезона: ЧКК имеет противоположный знак, нежели соответствующий КК: $r = 0.16$ (не значим на уровне 10%), $r_{\text{частный}} = -0.40$ (значим на уровне 10 %) (табл. 2). Геометрическая интерпретация для этого случая продемонстрирована на рис. 2: для $r = 0.16$ угол между рассматриваемыми векторами (депигментация сосны и суммарные осадки) острый и составляет 81°, а угол между проекциями этих векторов для $r_{\text{частный}} = -0.40$ уже тупой и соответствует 114°.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (КК) и частные коэффициенты корреляции (ЧКК), характеризующие связи средних по пробным площадям значений дефолиации и депигментации сосны и суммой годовых осадков

Table 2. Correlation coefficients (CC) and partial correlation coefficients (PCC), characterizing relationships between average values of stands defoliation and depigmentation and the sum of annual precipitation

Параметр состояния кроны	Сумма осадков	
	КК	ЧКК
Дефолиация сосны	-0.06	-0.11
Депигментация сосны	0.16	-0.40

Таким образом, ЧКК позволил подтвердить, что увеличение количества осадков текущего вегетационного сезона в среднем ведет к снижению депигментации сосны (Шерстнева и др., 2024). Так как наряду с осадками и уровнем вод в работе рассматривалась и температура воздуха, то проведенный комплексный анализ с применением ЧКК позволил обосновать, что лимитирующим фактором для развития фотосинтезирующего аппарата хвойных

¹⁰⁾ Дефолиация – явление опадания листьев/хвои при воздействии неблагоприятных факторов окружающей среды

¹¹⁾ Депигментация – изменение окраски листьев/хвои при воздействии неблагоприятных факторов окружающей среды

¹²⁾ Старосельский мох – верховое болото в Нелидовском районе Тверской области

поряд является не температура воздуха (теплом они в достаточной степени обеспечены на изучаемой территории), а количество осадков.

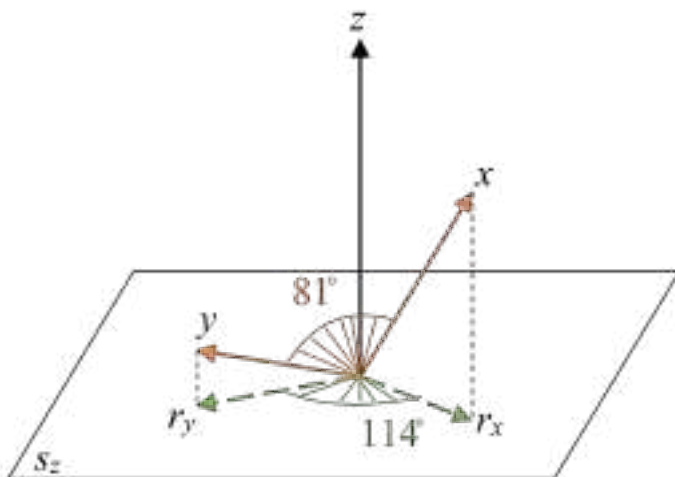


Рисунок 2. Геометрическая интерпретация частного коэффициента корреляции для табл. 2 между x и y при устранении влияния z (x – сумма осадков, y – депигментация, z – уровень воды в болоте)

Figure 2. Geometric interpretation of the partial correlation coefficient for table 2 between x and y when eliminating the influence of z (x is the amount of precipitation, y is depigmentation, z is the water level in the marsh)

Пример 2. В работе (Алаев, Осетров, 2010) выявлялись факторы подготовленности спортсменов, которые влияют на эффективность соревнований в учебно-тренировочном процессе при плавании в ластах. Рассматривалось преодоление дистанции 400 м с участием 96 спортсменов различного ранга: от Чемпионата области до Чемпионата России. Дистанция 400 м является самой длинной и считается одной из самых сложных, так как требует от спортсмена скоростной выносливости и спринтерских качеств: высокие энергетические запасы при старте на высокой скорости должны быть сопряжены с возможностями удержать начальную скорость на этом же уровне на остальных участках. У каждого спортсмена замерялось время прохождения каждой из четырех стометровок и находились корреляции с временем прохождения всей дистанции (табл. 3, второй столбец). Это делалось для того, чтобы выявить наиболее высокие взаимосвязи между временем прохождения дистанции и временем на каждой стометровке с целью разработки коррекции учебно-тренировочного процесса. Вполне оправданно ожидать, что при прохождении дистанции на разных ее участках между показателями одного спортсмена будут тесные взаимосвязи, что приведет к коллинеарности как между временем на разных участках, так и с временем на всей дистанции. Прибегнув к ЧКК, авторы выявили, что достаточно высокая степень влияния результатов на итоговое время проплывания дистанции имеется с результатами, в первую очередь, на 3-м ее отрезке (см. предпоследнюю

строку табл. 3, которая отражает ЧКК связи времени на 3-й стометровке с итоговым временем при фиксировании результатов на остальных стометровках). Этот вывод оказался важен для разработки стратегии: нужно распределить силы спортсмена так, чтобы не потерять время на стартовом участке и при этом обеспечить высокую скорость на третьей стометровке дистанции. Однако, чтобы продолжить анализ влияния результатов на остальных стометровках на общее время заплыва, авторы продолжили анализ (Алаев, Осетров, 2010). При комплексном подходе с использованием ЧКК выявлено, что для достижения наилучших результатов в зависимости от квалификации¹³⁾ при плавании в ластах на дистанции 400 м:

- спортсмен высокой квалификации должен проходить стометровки дистанции максимально ровно (по времени), что возможно обеспечить за счет его хорошей физической подготовки,
- спортсмен низкой квалификации должен начинать достаточно быстро, двигаясь далее с оптимальной для себя скоростью.

Таблица 3¹⁴⁾. Коэффициенты корреляции (КК) и частные коэффициенты корреляции (ЧКК), характеризующие связи между временем проплывания каждой стометровки с результатами по всей дистанции в 400 м

Table 3. Correlation coefficients (CC) and partial correlation coefficients (PCC), characterizing relationships between the swimming time of each 100 m with the results for the entire 400 m distance

Номер стометровки	КК	ЧКК			
		Зафиксированный фактор (номер стометровки)			
		1	2	3	4
1	0.947	–	0.56	0.72	0.85
2	0.988	0.92	–	0.70	0.88
3	0.992	0.96	0.80	–	0.83
4	0.979	0.94	0.79	0.48	–

Выводы и заключение

Приведенный в настоящем исследовании исторический контекст зарождения понятия частного коэффициента корреляции свидетельствует о том, что при обнаружении значимой связи между исследуемыми признаками всегда нужно задумываться о существовании скрытого фактора, который в действительности может обуславливать полученную связь. В работе приведены примеры, в которых из-за влияния неучтенных факторов может иска-

13) Квалификация спортсмена определялась авторами экспериментально: для спортсмена высокой квалификации разница между временем прохождения первой и второй половинами дистанции 400 м не должна превышать 6 с; в противном случае, спортсмен имеет низкую квалификацию (Алаев, Осетров, 2010)

14) Таблица составлена на основе результатов, представленных в работе (Алаев, Осетров, 2010)

жаться истинная связь между рассматриваемыми переменными. Для обнаружения таких связей предназначен частный коэффициент корреляции, благодаря которому могут быть приняты обоснованные выводы о наличии или отсутствии причинно-следственных связей.

В работе разобраны ситуации, приводящие к целесообразности расчета частных коэффициентов корреляции: выявление значимых факторов и отбор предикторов в линейную регрессионную модель. Рассмотрены возможные способы выхода на построение регрессионных моделей в условиях наличия коллинеарности среди предикторов. На модельных и натурных данных продемонстрирована реализация описанных ситуаций. Отдельное внимание в работе уделено графическому представлению частных коэффициентов корреляции. Представлены примеры, основанные на натурных данных, когда частный коэффициент корреляции меняет знак по отношению к обычному и ведет к изменению первоначальных выводов, полученных при помощи обычной корреляции; для случая трех переменных приведены ограничения, обеспечивающие сохранения знака. Описаны возможные выходы на проверку значимости частного коэффициента корреляции в условиях негауссовых выборок.

Полученные в работе выводы в работе и описанные подходы расширяют сферу корректного применения методов корреляционного анализа в прикладных исследованиях, в частности, при осуществлении экологического мониторинга и исследований.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы 4.4. «Развитие методов и технологий мониторинга и оценки загрязнения природной среды вследствие трансграничного атмосферного переноса загрязняющих веществ и кислотных выпадений (ЕЭК ООН: ЕМЕП, МСП КМ; ЕАНЕТ)» Плана НИТР Росгидромета, регистрационный номер 125031703847-1.

Список литературы

Алаев, С.В., Осетров, И.А. (2010) Частные корреляции при анализе плавления в ластах, *Ярославский педагогический вестник*, № 4, т. II (Психолого-педагогические науки), с. 117-122.

Антонова, И.И., Аронов, И.З., Белобрагин, В.Я., Максимова, О.В. (2014) Новое в оценке эффективности территориальных систем управления качеством, *Компетентность*, № 7(118), с. 26-31.

Апалькова, Т.Г. (2021) К вопросу выбора структуры многофакторной регрессионной модели на примере анализа факторов выгорания творческих работников, *Компьютерные исследования и моделирование*, т. 13, № 1, с. 265-274, doi 10.20537/2076-7633-2021-13-1-265-274.

Бернштейн, С.Н. (1932) Об одном элементарном свойстве коэффициента корреляции, *Зап. Харьк. матем. тов.*, т. 5, с. 65-66.

Горлов, А.И., Ивина, Е.А., Мокеев, И.А. (2009) Определение генетических корреляций селекционных признаков через частные корреляции, *Сельскохозяйственный журнал*, № 2 (2-2), с. 25-29.

Горячева, Е.М., Князева, С.А., Пластинина, Е.Д., Николина, В.М., Максимова, О.В. (2025) Корреляционно-регрессионный анализ в исследовании факторов, влияющих на стоимость посещения горнолыжных курортов, *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции*, Магнитогорск, 21-25 апреля 2025 года. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова с. 290.

Дрейпер, Н., Смит, Г. (1987) *Прикладной регрессионный анализ*. Книга 2, М., Финансы и статистика, 349 с.

Кобзарь, А.И. (2012) *Прикладная математическая статистика*, М., ФИЗМАТЛИТ, 816 с.

Лемешко, Б.Ю., Помадин, С.С. (2002) Корреляционный анализ наблюдений многомерных случайных величин при нарушении предположений о нормальности, *Сибирский журнал индустриальной математики*, т. 5, № 3(11), с.115-130.

Лунев, И.С., Некруткин, В.В. (2019) Замечание о некоторых классических критериях математической статистики, *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*, т. 6 (64), вып. 2, с. 221-231, doi: 10.21638/11701/spbu01.2019.204.

Максимова, О.В. (2024) Об ошибках обращения с коэффициентом корреляции Пирсона, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 3-4, с. 88-102, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-88-102.

Максимова, О.В. (2025) Осторожно с корреляцией! *Математика в школе*, № 1, с. 57-66, doi: 10.47639/0130-9358_2025_1_57.

Сидорчукова, Е.В., Бойко, И.П., Сергеева, В.А., Шелакова, А.А. (2022) Корреляционный и регрессионный анализ как метод изучения и прогнозирования экономических показателей, *Естественно-гуманитарные исследования*, № 4 (42), с. 418-423.

Сметанина, Е.А., Лукьяненко, Н.В., Лысов, В.А., Сметанин, А.Г., Леонов, С.Л. (2012) Возможности статистических методов для прогнозирования показателей смертности от туберкулеза и заболеваемости туберкулезом, *Сибирское медицинское обозрение*, № 75(3), с. 87-91.

Шерстнева, Е.А., Максимова, О.В., Кухта, А.Е., Тихонова, И.О. (2024) Воздействие климатических факторов на состояние модельных древостоев Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 3-4, с. 38-55, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-38-55.

Fisher, R.A. (1924) The distribution of the partial correlation coefficient. *Metron*, no. 3(3-4), pp. 329-332.

Pearson, E.S., Plackett, R.L., Barnard, G.A. (1990) *Student: A Statistical Biography of William Sealy Gosset*, New York, Clarendon Press, 150 p.

Rummel, R.J. (1976). *Understanding Correlation*, Honolulu, Hawaii: Department of Political Science, University of Hawai'i.

Rummel, R.J. (1967). Understanding factor analysis, *Journal of Conflict Resolution*, no. 11(4), pp. 444-480, doi:10.1177/002200276701100405.

Spearman, C. (1907) Demonstration of formula for true measurement of correlation, *The American Journal of Psychology*, vol. 18, iss. 2, pp. 161-169.

Yule, G.U. (1895) On the Correlation of Total Pauperism with Proportion of Out-relief, *The Economic Journal*, vol. 5, no. 20, pp. 603-611, <https://doi.org/10.2307/2956650>.

Yule, G.U. (1897) On the significance of Bravais Formulas for Regression, & c., in the case of Skew Correlation, *Proceedings Of The Royal Society Of London*, vol. LX, pp. 477-489.

Yule, G.U. (1907) On the Theory of Correlation for any Number of Variables, Treated by a New System of Notation, *Royal Society of London*, vol. 79, pp. 182-193, doi: 10.1098/rspa.1907.0028.

Reference

Alayev, S.V., Osetrov, I.A. (2010) Chastnyye korrelyatsii pri analize plavaniya v lastakh [Partial correlations in the analysis of swimming with fins], *Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik*, 4(2), pp. 117-122.

Antonova, I.I., Aronov, I.Z., Belobragin, V.YA., Maksimova, O.V. (2014) Novoye v otsenke effektivnosti territorial'nykh sistem upravleniya kachestvom [New in assessing the effectiveness of territorial quality management systems], *Kompetentnost'*, 7(118), pp. 26-31.

Apal'kova, T.G. (2021) K voprosu vybora struktury mnogofaktornoy regressionnoy modeli na primere analiza faktorov vygoraniya tvorcheskikh rabotnikov [On the issue of choosing the structure of a multivariate regression model using the example of analyzing burnout factors in creative workers], *Computer Research and Modeling*, 13(1), pp. 265-274, doi 10.20537/2076-7633-2021-13-1-265-274

Bernshteyn, S.N. (1932) Ob odnom elementarnom svoystve koeffitsiyenta korrelyatsii [On an elementary property of the correlation coefficient], *Zap. Khar'k. matem. tov.*, 5, pp. 65-66.

Gorlov, A.I., Ivina, Ye.A., Mokeyev, I.A. (2009) Opredeleniye geneticheskikh korrelyatsiy selektsion-nykh priznakov cherez chastnyye

korrelyatsii [Determination of genetic correlations of selection traits through partial correlations], *Sel'skokhozyaystvennyy zhurnal*, 2 (2-2), pp. 25-29.

Goryacheva, Ye.M., Knyazeva, S.A., Plastinina, Ye.D., Nikolina, V.M., Maksimova, O.V. (2025) Korre-lyatsionno-regressionnyy analiz v issledovanii faktorov, vliyayushchikh na stoimost' poseshcheniya gornolyzhnykh kurortov, *Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: Tezisy dokladov 83-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Magnitogorsk, 21-25 aprelya 2025 goda*. Magnitogorsk: Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet im. G.I. Nosova, p. 290.

Dreyer, N., Smit, G. (1987) Prikladnoy regressionnyy analiz. Kniga 2 [Applied regression analysis. Book 2]. *Finansy i statistika*, Moscow, Russia, 349 p.

Kobzar', A.I. (2012) *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists], Fizmatlit, Moscow, Russia, 816 p.

Lemeshko, B.YU., Pomadin, S.S. (2002) Korrelyatsionnyy analiz nablyudeniy mnogomernykh sluchaynykh velichin pri narushenii predpolozheniy o normal'nosti [Correlation Analysis of Observations of Multivariate Random Variables under Violation of Normality Assumptions], *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki*, 5(3(11)), pp.115-130.

Lunev, I.S., Nekrutkin, V.V. (2019) Zamechaniye o nekotorykh klassicheskikh kriteriyakh matematicheskoy statistiki [A Note on Some Classical Criteria of Mathematical Statistics], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*, 6(64), vyp. 2, pp. 221-231, doi: 10.21638/11701/spbu01.2019.204.

Maksimova, O.V. (2024) Ob oshibkakh obrashcheniya s koeffitsiyentom korrelyatsii Pirona [On the errors of handling the Pearson correlation coefficient], *Ekologicheskiiy monitoring i modelirovaniye ekosistem*, t. XXXV, № 3-4, pp. 88-102, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-88-102.

Maksimova, O.V. Ostorozhno s korrelyatsiyey! [Be careful with correlation!] *Matematika v shkole*, no. 1, pp. 57-66, doi:10.47639/0130-9358_2025_1_57.

Sidorchukova, Ye.V., Boyko, I.P., Sergeyeva, V.A., Shelakova, A.A. (2022) Korrelyatsionnyy i regres-sionnyy analiz kak metod izucheniya i prognozirovaniya ekonomicheskikh pokazateley [Correlation and regression analysis as a method for studying and forecasting economic indicators], *Yestestvenno-gumanitarnyye issledovaniya*, 4(42), pp. 418-423.

Smetanina, Ye.A., Luk'yanenko, N.V., Lysov, V.A., Smetanin, A.G., Leonov, S.L. (2012) Vozmozhnosti statisticheskikh metodov dlya prognozirovaniya pokazateley smertnosti ot tuberkuleza i zabolevaye-mosti tuberkulezom [Possibilities of statistical methods for forecasting tuberculosis mortality and incidence rates], *Sibirskoye meditsinskoye obozreniye*, 75(3), pp. 87-91.

Sherstneva, Ye.A., Maksimova, O.V., Kukhta, A.Ye., Tikhonova, I.O. (2024) Vozdeystviye klimaticheskikh faktorov na sostoyaniye model'nykh drevostoyev Tsentral'no-lesnogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika [The Impact of Climatic Factors on the State of Model Forest Stands of the Central Forest State Nature Biosphere Reserve], *Ekologicheskii monitoring i modelirovaniye ekosistem*, v. XXXV, no. 3-4, pp. 38-55, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-38-55.

Fisher, R.A. (1924) The distribution of the partial correlation coefficient, *Metron*, no. 3(3-4), pp. 329-332.

Pearson, E.S., Plackett, R.L., Barnard, G.A. (1990) *Student: A Statistical Biography of William Sealy Gosset*, New York, Clarendon Press, 150 p.

Rummel, R.J. (1976). *Understanding Correlation*. Honolulu, Hawaii: Department of Political Science, University of Hawai'i.

Rummel, R.J. (1967) Understanding factor analysis, *Journal of Conflict Resolution*, no. 11(4), pp. 444-480, doi:10.1177/002200276701100405.

Spearman, C. (1907) Demonstration of formula for true measurement of correlation, *The American Journal of Psychology*, vol. 18, iss. 2, pp. 161-169.

Yule, G.U. (1895) On the Correlation of Total Pauperism with Proportion of Out-relief, *The Economic Journal*, vol. 5, no. 20, pp. 603-611, <https://doi.org/10.2307/2956650>.

Yule, G.U. (1897) On the significance of Bravais Formulas for Regression, & c., in the case of Skew Correlation, *Proceedings Of The Royal Society Of London*, vol. LX, pp. 477-489.

Yule, G.U. (1907) On the Theory of Correlation for any Number of Variables, Treated by a New System of Notation, *Royal Society of London*, vol. 79, pp. 182-193, doi: 10.1098/rspa.1907.0028.

Статья поступила в редакцию (Received): 11.08.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 10.09.2025.

Для цитирования / For citation:

Максимова, О.В. (2025) Роль частного коэффициента корреляции в статистических выводах, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVI, № 3-4, с. 133-151, doi:10.24412/2782-3237-2025-3-4-133-151.

Maksimova, O.V. (2025) The role of the partial correlation coefficient in statistical inference, *Ecological monitoring and modeling of ecosystems*, v. XXXVI, no. 3-4, pp. 133-151, doi:10.24412/2782-3237-2025-3-4-133-151.