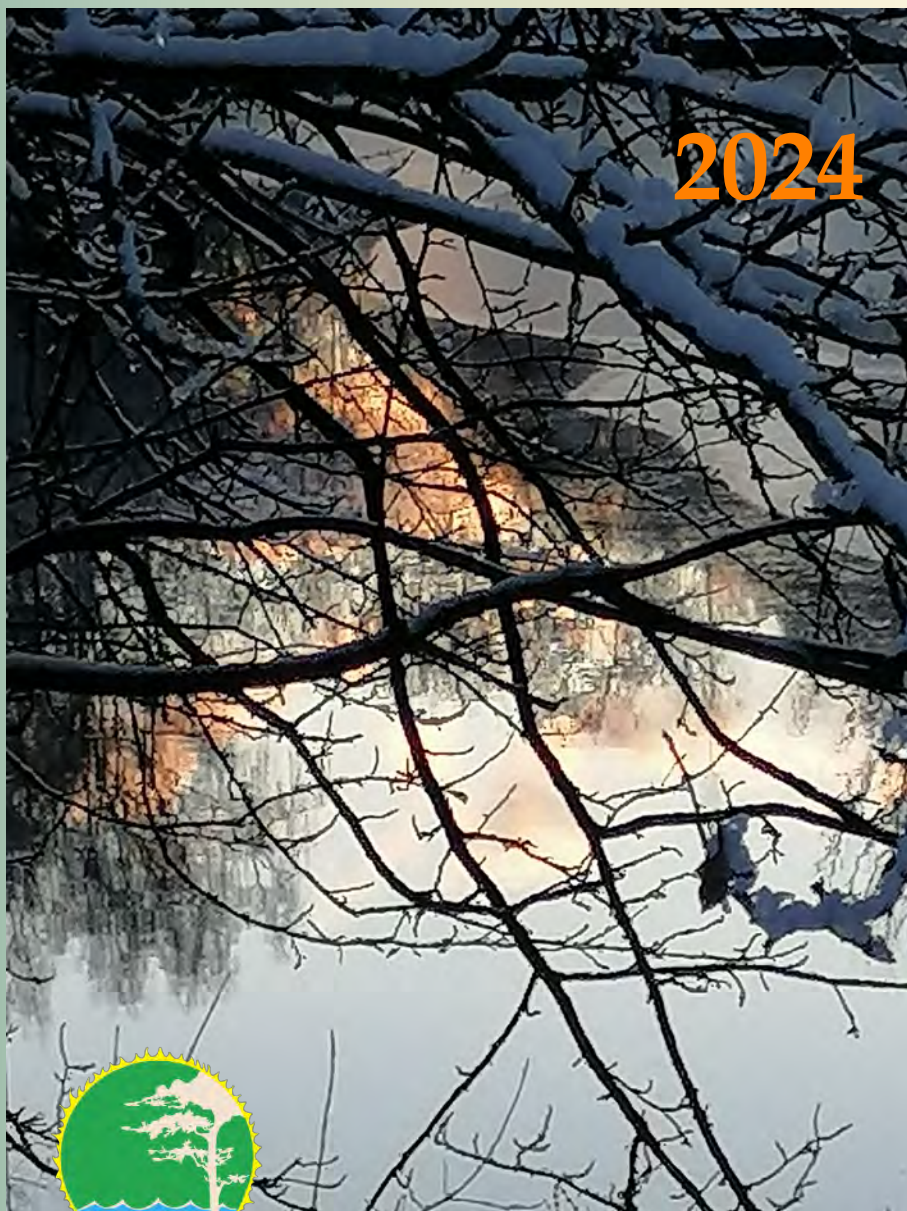


ISSN 2782-3237

Экологический мониторинг и моделирование экосистем

Environmental Monitoring
and Ecosystem Modelling

Том XXXV № 3-4



Москва 2024

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

**ENVIRONMENTAL MONITORING
AND ECOSYSTEM MODELLING**

Volume XXXV

№ 3-4

Moscow 2024

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

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ**

Том XXXIV № 3-4 2024 год

Научный редактор: С.Б. Суслова

Выпускающий редактор: В.А. Гинзбург

Технические редакторы:

И.М. Брускина,

Л.В. Кудрявцева

Верстка: Л.А. Прохорова

Фото на обложке:

Б.А. Кухты

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

Москва 2024

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

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ

Том XXXV

№ 3-4

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

VIII Всероссийский объединенный метеорологический и гидрологический съезд.....	5
---	---

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

Нахутин А.И. К истории ФГБУ ИГКЭ: о здании на Глебовской улице.....	9
---	---

ИССЛЕДОВАНИЯ

Кудрявцева Л.В., Попов Н.С., Гинзбург В.А. Пространственное распределение выбросов метана от стационарных источников сжигания топлива на территории РФ.....	18
Шерстнева Е.А., Максимова О.В., Кухта А.Е., Тихонова И.О. Воздействие климатических факторов на состояние модельных древостоев Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника.....	38

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ МОНИТОРИНГА

Шушпанова Д.В., Якушина А.М., Тихонова И.О., Голуб О.В. Анализ состояния отрасли по обращению с отходами производства и потребления в контексте климатической повестки.....	56
--	----

ИССЛЕДОВАНИЕ В РАМКАХ ВИП ГЗ

Вертянкина В.Ю. Оценка выбросов метана от животноводства на территории Российской Федерации.....	73
---	----

СООБЩЕНИЯ

Максимова О.В. Об ошибках обращения с коэффициентом корреляции Пирсона.....	88
Карпова Г.А., Захаров В.П. Тюльпан Биберштейна в Восточном Подмосковье.....	103

CONTENTS

FROM THE EDITORIAL BOARD

The VIII All-Russian United Meteorological and Hydrological Congress.....5

EVENTS AND COMMEMORATIVE DATES

Nakhutin A.I.

On the history of the Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology:
about the building on Glebovskaya Street.....9

STUDIES

Kudryavtseva L.V., Popov N.S., Ginzburg V.A.

Spatial distribution of methane emissions from stationary fuel
combustion sources on the territory of the Russian Federation.....18

Sherstneva E.A., Maksimova O.V., Koukhta A.E., Tikhonova I.O.

The impact of climatic factors on the state of model stands of the
Central Forest state natural biosphere reserve.....38

MONITORING

Shushpanova D.V., Yakushina A.M., Tikhonova I.O., Golub O.V.

Industrial and household waste management industry status analysis
in the context of climate agenda.....56

RESEARCH WITHIN THE FRAMEWORK OF THE MOST IMPORTANT INNOVATIVE PROJECT OF THE STATE ASSIGNMENT

Vertyankina V. Yu.

Refinement of estimates of methane emissions from cattle in the national
inventory of anthropogenic emission of greenhouse gases on the territory
of the Russian Federation.....73

MESSAGES

Maksimova O.V.

On the errors of handling the Pearson correlation coefficient.....88

Karpova G.A., Zakharov V.P.

Bieberstein's Tulip in the Eastern Moscow region.....103

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

29-31 октября 2024 г. по распоряжению Правительства Российской Федерации от 02 ноября 2023г. № 3058-р о проведении мероприятий, посвященных 190-летию со дня создания гидрометеорологической службы России, в Санкт-Петербурге состоялся VIII Всероссийский объединенный метеорологический и гидрологический съезд.



В ходе торжественного открытия съезда с приветственным словом выступили:

- Дмитрий Николаевич Патрушев – заместитель председателя Правительства Российской Федерации;
 - Александр Александрович Козлов – Министр природных ресурсов и экологии Российской Федерации;
 - Александр Дмитриевич Беглов – губернатор Санкт-Петербурга.
- С пленарными докладами выступили:
- Шумаков Игорь Анатольевич – руководитель Росгидромета;
 - Соколов Владимир Владимирович – заместитель руководителя Росгидромета.

Основной целью Съезда являлось обсуждение актуальных проблем метеорологической и гидрологической науки и практики в условиях изменения климата, выработка рекомендаций по консолидации имеющегося в стране научно-технического и производственного потенциала для решения приори-

тетных задач в области метеорологии, климатологии, гидрологии и водного хозяйства, а также развитие взаимодействия научных сообществ на национальном и международном уровнях.

Кроме представителей Центрального аппарата Росгидромета, в работе съезда приняли участие сотрудники таких научных и образовательных организаций, как Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Гидрометцентр России, Гидрохимический институт, Государственный гидрологический институт, Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Институт водных проблем РАН, Институт водных проблем Севера Карельского НЦ РАН, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Институт физики атмосферы РАН им. А.М. Обухова, Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля», Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российское гидрометеорологическое общество, Уральский федеральный университет, коллеги из Управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) и других научных и образовательных учреждений.

От ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» в работе Съезда приняли участие А.А. Романовская, В.А. Гинзбург, О.Н. Липка, Г.М. Черногаева, В.А. Безденежных, А.С. Конькова, О.Ф. Самохина



На секционных пленарных заседаниях обсуждались развитие государственной метеорологической наблюдательной сети, совершенствование метеорологических исследований, оптимизация прогнозирования погоды и климата, продвижение климатического облуживания и адаптаций. Также в фокусе вни-

мания был мониторинг состава и загрязнения атмосферы. Были рассмотрены такие вопросы, как состояние и перспективы развития системы гидрологического мониторинга, проблемы охраны водных объектов и качества вод.



Кроме того, в рамках мероприятия работала международная выставка «Погода. Климат. Вода / Дистанционное зондирование Земли / Зеленая экономика», посвященная работе Росгидромета и достижениям его сотрудников (<https://www.irmeteo.ru/index.php?id=866>).

В решении съезда отражено, что, учитывая новые вызовы, стоящие перед российским гидрометеорологическим сообществом, необходимо безотлагательно разработать новую Стратегию деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2036 года (с учетом аспектов изменения климата) (далее – Стратегия).

Структура новой Стратегии должна базироваться на обеспечении гидрометеорологической безопасности, выпуске и доведении информации и продукции до потребителей в лице государства, вооруженных сил, юридических и физических лиц.

В новой Стратегии в системном виде должно быть отражено решение задач участников гидрометеорологической деятельности в следующих областях:

1. Обеспечение устойчивого функционирования и дальнейшего развития государственной наблюдательной сети.
2. Обеспечение гидрометеорологической безопасности, совершенствования и повышения эффективности обеспечения населения, органов государственной власти, отраслей экономики экстренной гидрометеорологической и

гелиогеофизической информацией, а также информацией об экстремально высоком загрязнении окружающей среды.

3. Развитие гидрометеорологического и климатического обслуживания, включая специализированное гидрометеорологическое обеспечение и работы специального назначения по мониторингу загрязнения окружающей среды.

4. Научные исследования.

5. Организация работ и экспедиционных исследований в Мировом океане, Арктике и Антарктике.

6. Активные воздействия на гидрометеорологические процессы.

7. Развитие кадрового потенциала.

8. Развитие внутриотраслевых взаимодействий участников гидрометеорологической деятельности.

9. Инновации и импортозамещение.

10. Международное сотрудничество.

Участники съезда выразили благодарность Оргкомитету Съезда, Программному комитету Съезда, коллективам Государственного гидрологического института и Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова за высокий уровень организации Съезда.

Материал подготовлен с использованием информации, размещенной на сайтах (Росгидромета, <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/39022/>), Гидрометцентра России (<https://www.meteorf.gov.ru/press/news/39022/>), ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (<http://www.igce.ru>).

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

DOI: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-9-17

УДК [550.3+502/504]:908 (470+571)

К истории ФГБУ ИГКЭ: о здании на Глебовской улице

*А.И. Нахутин**

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

* Адрес для переписки: ainakh@rambler.ru

On the history of the Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology: about the building on Glebovskaya Street

*A.I. Nakhutin**

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

*Correspondence address: ainakh@rambler.ru

История здания на Глебовской начиналась в 1956-1957 годах. В первое время созданный в январе 1956 г. Институт прикладной геофизики (ИПГ) располагался, наряду с двумя другими академическими институтами, в здании бывшего Геофизического института АН СССР на Большой Грузинской улице; сотрудники его работали в большой тесноте, рабочий процесс был организован в две смены. Рост численности коллектива и необходимость расширения базы для экспедиционных работ настоятельно требовали увеличения занимаемой площади. С учетом большой оборонной важности решаемых задач было принято решение о предоставлении ИПГ отдельного здания в Москве.

По версии одного из старейших сотрудников ИПГ Г.С. Кирдина, решение этой задачи сопровождалось немалыми трудностями. «В то время (1957 г.) нашей страной руководил Никита Сергеевич Хрущёв, который осуществлял целый ряд экстравагантных мероприятий. По его указанию многие научные учреждения переводились из Москвы. Это объяснялось тем, что, в частности, надо было улучшить соотношение численности в Москве рабочего класса и интеллигенции. Так что о получении тогда нового здания в Москве для научного института не могло быть и речи, а институт задыхался от недостатка рабочих площадей. Евгений Константинович Фёдоров¹⁾, понимая это, начал строить филиал института в городе Обнинске Калужской области. Это был новый научный город, возникший вокруг первой в мире атомной электростанции. В дальнейшем там разместились многие научные институты, так или иначе связанные с радиационной тематикой» (Кирдин, 2018).

Определяющим условием при выборе места строительства была возможность сооружения высотной метеорологической мачты (Воспоминания..., 2010). «Решение о строительстве в Обнинске филиала ИПГ было правильным, в духе времени, оно же помогло потом получить новое здание и в Москве. Когда где-то на высшем уровне встал вопрос о выводе института из Москвы, Евгений Константинович доложил, что это уже осуществлено, что Институт прикладной геофизики теперь располагается не в Москве, а в Калужской области. Но так как некоторые ученые – в основном, уже немолодые – по разным причинам не могут переехать на новое место работы, то, чтобы не разрушить научный коллектив, он просит предоставить помещение для организации небольшого Московского филиала института. Эта просьба была удовлетворена, тем более что новое здание школьного типа, предназначавшееся ранее для техникума цветной металлургии, переведённого в рамках той же хрущёвской кампании в Казахстан, пос. Коунрад²⁾ на берег озера Балхаш, где расположено месторождение медной руды, оказалось свободным. Рассматривалось, в частности, и ещё одно место для института. Это были здания выведенного из Москвы завода «Клейтук», где раньше делали клеи из отходов животноводства, но устойчивый и совершенно непереносимый запах, стоявший в том районе, делал это место абсолютно непригодным» (Кирдин, 2018).

Версия Г.С. Кирдина представляется вполне возможной, но Юрий Антониевич Израэль, которому, по его словам, Е.К. Федоров поручил осмотр предлагаемых для переезда зданий, не упоминал об этом. Он рассказывал, что осматривал несколько зданий; и однажды во время поездки на совещание в Росгидромет показал из окна машины автору этой статьи на небольшой дом возле метро «Краснопресненская» (Конюшковская улица, 31) со словами, что забраковал его как недостаточный по размеру. Перспектива увеличения численности и расширения материальной базы ИПГ была тогда уже совершенно ясной – требовалось много площадей для кабинетов и лабораторий и достаточно большой двор для стоянки экспедиционных и хозяйственных автомобилей.

Через некоторое время здравый смысл все-таки возобладал, переехавшие в новое здание отделы сохранили за собой статус института, а обнинское подразделение, последовательно сменив свое наименование на «Обнинский полигон ИПГ» и «Обнинское отделение ИПГ», позже все-таки стало филиалом ИПГ, а затем было преобразовано в отдельную научную организацию – Институт экспериментальной метеорологии³⁾ (Крышев, 2018; Воспоминания ..., 2010).

¹⁾ Фёдоров Евгений Константинович – геофизик, участник дрейфа на полярной станции «Северный полюс-1». В 1939-1946 и 1962-1974 гг. – начальник Гидрометслужбы СССР. С марта 1955 – директор отделения прикладной геофизики Геофизического института АН СССР, в марте 1956 – октябре 1962 и в 1974-1981 гг. директор Института прикладной геофизики. Действительный член Академии наук СССР, в 1959-1962 годах был главным учёным секретарём Президиума Академии наук СССР. Герой Советского Союза (1938) – *прим. ред.*

²⁾ С 2013 г. – Конырат, микрорайон города Балхаш – *прим. ред.*

³⁾ В настоящее время – Научно-производственное объединение «Тайфун» – *прим. авт.*

И вот, как говорится: «Не было бы счастья, да несчастье помогло!», летом 1957 года наш институт в полном составе переехал (вместо несчастного техникума) в только что отстроенное здание на Глебовскую улицу, дом № 20Б (район Богородское на северо-востоке Москвы)» (Кирдин, 2018). По проекту здание (рис. 1) должны были украсить различными декоративными деталями. Но вышедшее постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 4 ноября 1955 года № 1871 «Об устранении излишеств в проектировании и строительстве» не позволило реализовать этот проект во всей красе. Из реализованного оказался только декоративный профилированный карниз на уровне 4 и 5 этажей, а также две полуциркульные ниши в уровне пятого этажа, в которых, предположительно, должны были располагаться статуи. Стоит только сожалеть, что проект не успели реализовать до 1955 года. Автором типового проекта выступил архитектор Георгий Васильевич Севан (1915-1981). Это пятиэтажное кирпичное здание и сейчас считается самой монументальной постройкой на Глебовской улице (Глебовская улица..., 2022)⁴).



Рисунок 1. Только что построенное здание, 1957 год
Фотография с сайта https://dzen.ru/a/Y45bkf-DxhILDn7L?utm_referrer=www.google.com&is_autologin_ya=true, канал «Память места_Москва»

Figure 1. Newly constructed building, 1957

В 2019 году по этому адресу был утрачен один важный исторический элемент, которых практически уже нет в Москве. На одном из оригинальных

⁴) На этом же сайте имеется много интересных сведений об истории Глебовской улицы и ближайших к ней улиц и переулков – прим. авт.

пилонов ворот располагался старый аншлаг-домик (рис. 2). В Богородском этот был одним из последних. Теперь на его месте современный адресный указатель (Глебовская улица..., 2022).



Рисунок 2. Аншлаг-домик с номерным указателем на одном из пилонов ворот, 2016 г.

Фотография с сайта https://dzen.ru/a/Y45bkf-DxhILDn7L?utm_referrer=www.google.com&is_autologin_ya=true, канал «Память места_Москва»

Figure 2. A signboard with a number sign on one of the gate pylons, 2016

По воспоминаниям ветеранов института и жителей района, в те времена Глебовская улица была застроена небольшими, по преимуществу одноэтажными домами и деревянными бараками, и краснокирпичное здание ИПГ возвышалось над ними как своеобразный небоскреб местного значения. Застройка Глебовской и близлежащих улиц пятиэтажными жилыми зданиями из серого кирпича началась лишь в самом конце 50-х годов. Ближайшей станцией метро были «Сокольники», от нее ходил автобус, на котором сотрудники ездили в институт на работу. Наиболее спортивные из них иногда ходили от метро или до метро пешком.

Предоставленное институту здание школьного типа не могло быть использовано без перестройки. Нужны были серьезные переделки, и они начались. «Это школьное здание было нового проекта – там предусматривался большой – в два света – спортивный зал. Говорили, что Юра Израэль, тогдашний комсомольский руководитель, упрашивал Евгения Константиновича оставить этот зал для спортивных занятий наших сотрудников, но дефицит площадей был слишком велик. И зал перегородили по вертикали – сделали два не очень высоких этажа. Там разместилась библиотека, сидели переводчицы» (Кирдин, 2018). Располагались в бывшем спортзале и некоторые другие службы – например, патентная.

«Основным модулем в здании являлся класс площадью 45 м² с тремя большими окнами, на торцевой стороне которого находилась доска для писания мелом. В таком виде сохранился только один класс – это нынешний кабинет директора (раньше он назывался «малый конференц-зал»). Все другие классы были разделены фанерными перегородками на три, некоторые – на две комнаты. Вместо коридоров, как в старых школах, в здании были широкие рекреационные (для прогулок на переменах) залы. Их тоже разгородили на клетушки, примерно по 10 м². «Дефицит площадей был так велик – вспоминает Г.С. Кирдин, что пришлось пойти даже на то, чтобы использовать под химические лаборатории туалеты – к ним была подведена вода. Как положено в школе, на каждом этаже было по два туалета («М» и «Ж») для школьников и ещё для учителей. Оставили только три туалета: два «М» на втором этаже около дирекции и около мастерской и один «Ж» на четвёртом этаже.

«И все равно площадей не хватало! Через некоторое время перед первым этажом⁵⁾ сделали пристройку, потом во дворе института возвели двухэтажный флигель и рядом с ним – хранилище для радиоактивных веществ⁶⁾. Для них построили что-то вроде гаража, где водители могли в любую погоду возиться с машинами» (Кирдин, 2018). В 60-80-е годы весь двор института был заставлен экспедиционными и хозяйственными автомобилями, но транспорта все равно иногда не доставало. Дополнительные экспедиционные автомобили арендовали на автобазе Академии наук СССР.

Теснота в институте сохранялась долго. Уже в гораздо более позднее время автору пришлось работать сидя буквально спиной к спине с сотрудницей нашего отдела И.Ф. Дликман: спинки наших стульев практически упирались одна в другую. Мы с Ириной, к удовольствию коллег, присвоили себе наименование сиамских близнецов.

В самом здании... были выделены помещения для партбюро и местного профсоюзного комитета (местком). Две комнаты были предназначены для спецотдела: одна – для сотрудников этого отдела, другая – для сейфов с секретными документами.

«Пятый неполный этаж был предназначен для конференц-зала, в котором проходили партийные и профсоюзные собрания, научные семинары, а иногда (в кануны общегосударственных праздников, юбилейных дат Гидрометслужбы или самого института) торжественные заседания. В одном торце этого зала был оборудован подиум, на котором стоял длинный стол для президиума, рояль и бюст В.И. Ленина. На стене за столом президиума был прикреплён большой знак ордена Трудового Красного Знамени, которым был награждён институт и было поставлено красное знамя института. То есть всё было, как того требовали установки того времени... Был даже занавес – можно было проводить какие-то представления – главным образом во время детских праздников: новогодней ёлки и в дни школьных каникул... Другой

⁵⁾ Со стороны фасада здания – прим. авт.

⁶⁾ Общеинститутский склад имущества располагался там же – прим. авт.

торец зала через некоторое время был отгорожен для появившейся в институте электронной вычислительной машины (ЭВМ) – «Урал»⁷⁾» (Кирдин, 2018).

«Мне надо было выбить комнату с вытяжкой и водой для химической подготовки проб и помещение, где можно было установить очень тяжелый защитный домик для... счетчика⁸⁾. Это была почти невыполнимая задача... Нужные помещения для радиоуглеродной установки в конце концов удалось «выбить». Аргументом для получения комнаты, где должна проходить подготовка проб, послужило то обстоятельство, что там по требованиям техники безопасности необходим был вытяжной шкаф, а вот с помещением для счетчика было сложнее. Защитный домик нельзя было ставить где-то на этажах – могли не выдержать перекрытия. Нужно было подвальное помещение. Вообще-то подо всем зданием института находится подвал, но он использовался как бомбоубежище, а в то время, когда все готовились к возможному ядерному удару со стороны американцев, оно было абсолютно неприкосновенным.

Бомбоубежище имело два входа: один – основной и другой, в противоположном конце здания – запасной... В районе запасного входа был небольшой закуток, и мне удалось уговорить начальника гражданской обороны, чтобы он разрешил нам поставить там защитный домик для счетчика. Мне кажется, что он подумал, что защитный домик усилит бомбоубежище! Так это или не так, но мы получили пусть и маленькое, но отдельное помещение, к тому же совершенно изолированное – это было важно, потому что грязь, переносимая на ногах, увеличивала общий фон установки» (Кирдин, 2018).

С радиоактивным фоном был связан и еще один эпизод. После аварии на Чернобыльской атомной электростанции институт принимал деятельное участие в картировании и мониторинге радиоактивного загрязнения в зоне ее воздействия, и водители мыли приехавшие из Чернобыля машины струей воды из шланга в институтском дворе. В результате, фон на территории института был повышенным по сравнению с окружающей территорией – впрочем, это повышение оставалось в безопасных пределах.

Историческая справка

Институт прикладной геофизики (ИПГ), в настоящее время носящий имя своего основателя академика Евгения Константиновича Федорова, был создан в январе 1956 г. в результате разделения Геофизического института АН СССР (ГеоФИАН) на Институт прикладной геофизики, Институт физики Земли и Институт физики атмосферы. В его состав вошла также Геофизическая комплексная экспедиция (ГКЭ) – первоначально созданная как структур-

⁷⁾ Позже для институтского вычислительного центра был оборудован большой зал на первом этаже – *прим. авт.*

⁸⁾ Имеется в виду счетчик низкоэнергетического бета-излучения – *прим. авт.*

ное подразделение Института теоретической геофизики АН СССР – одного из предшественников ГеоФИАНа, но потом выделенная в отдельную организацию и переданная в ведение Министерства среднего машиностроения – предшественника нынешнего Росатома. Первоначально ГКЭ занималась научным обеспечением поиска месторождений радиоактивных руд и самолетной гамма-съемкой перспективных, с точки зрения возможностей обнаружения месторождений, радиоактивных руд на территории Средней Азии и Казахстана.

Основными задачами ИПГ в тот период, в развитие уже выполнявшихся под руководством Е.К. Федорова⁹⁾ в интересах Советского атомного проекта работ, были исследование и контроль радиоактивного загрязнения атмосферы, земной поверхности и космического пространства, проводившиеся как непосредственно на атомном полигоне под Семипалатинском, так и за его пределами. ИПГ участвовал также в решении задачи обнаружения и анализа характеристик ядерных взрывов, проводимых зарубежными государствами. Позже возникли и другие научные и научно-прикладные направления. В течение недолгого времени, в начале 60-х годов, ИПГ находился в подчинении Минсредмаша, но затем, по-видимому, в результате приложенных Е.К. Федоровым усилий, был передан в ведение Главного управления Гидрометеослужбы при Совете Министров СССР (Васильев, 2009)^{10, 11, 12)}.

В 1990 г. в здании на Глебовской (рис. 3, 4) начал свою работу созданный по инициативе академика Юрия Антониевича Израэля (рис. 5) Институт глобального климата и экологии Госкомгидромета СССР и АН СССР (в настоящее время – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (ФГБУ «ИГКЭ»), подведомственное Росгидромету.) Базой для создания ИГКЭ послужили Лаборатория мониторинга природной среды и климата Госкомгидромета и АН СССР (ЛАМ) и часть отделов ИПГ (Бардин и др., 2019).

Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова переместился в другое здание, находящееся в московском районе Ростокино. Кроме ИГКЭ в здании на Глебовской в настоящее время размещается Департамент Росгидромета по Центральному федеральному округу.

⁹⁾ Взаимодействовавшего по этим вопросам с научным руководителем Советского атомного проекта И.В. Курчатовым – *прим. авт.*

¹⁰⁾ Геофизический институт АН СССР. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BE%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B8%D0%BD%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%82%D1%83%D1%82_%D0%90%D0%9D_%D0%A1%D0%A1%D0%A1%D0%A0, (дата обращения 12.09.2024 г.)

¹¹⁾ ИГКЭ. Режим доступа: <http://www.igce.ru/>, (дата обращения 12.09.2024 г.)

¹²⁾ Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова. Режим доступа: <http://ipg.geospace.ru/>, (дата обращения 17.09.2024 г.)

При подготовке этой статьи автор, помимо литературных источников, пользовался устными воспоминаниями ветеранов ИПГ и ИГКЭ Е.М. Артемова, Ю.Ф. Барабанщикова, В.П. Седякина и уже ушедших к настоящему времени из жизни Ю.А. Израэля, В.Н. Василенко и Р.Т. Карабана.



Рисунок 3. Современный вид здания

Figure 3. Modern view of the building



Рисунок 4. Мемориальная доска на стене Института: Евгений Константинович Федоров (1910-1981)

Figure 4. Memorial plaque on the wall of the Institute: Evgeny Konstantinovich Fedorov (1910-1981)



Рисунок 5. Бюст Ю.А. Израэля в здании Института

Figure 5. Bust of Yu. A. Izrael in the building of the Institute

Список литературы

Бардин, М.Ю., Буйволов, Ю.А., Воробьев, В.А. и др. (2019) Тридцатилетие института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 5-57.

Васильев, А.П. (2009) Атомный проект СССР и развитие отечественной геофизики, *История наук о Земле*, т. 2, № 3, с. 20-33.

Воспоминания о академике Е.К. Федорове «Этапы большого пути» (2010) Автор-составитель Ю.Ф. Барабанщиков, Изд-во «Паулсен», с. 49-66.

Глебовская улица и окрестности. Институт глобального климата и экологии в Богородском (2022) Режим доступа: <https://dzen.ru/a/Y45bkf-DxhILDn7L>, (дата обращения 5.09.2024 г.)

Кирдин, Г.С. (2018) *Воспоминания. Второй том. Сын. 50 лет в ядерной геофизике*, М., Издательство «Ким Л.А.», 388 с.

References

Bardin, M.Yu., Buyvolov, Yu.A., Vorobyov, V.A. et al. (2019) Tridtsat' let Institutu global'nogo klimata i ekologii imeni akademika Yu.A. Izrael' [Thirtieth anniversary of the Institute of Global Climate and Ecology named after academician Yu.A. Israel], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 1, pp. 5-57.

Memoirs of academician E.K. Fedorov "Stages of a long journey" (2010) Author-compiler Yu.F. Barabanshchikov, Publishing house "Paulsen", pp. 49-66.

Vasiliev, A.P. (2009) Atomnyy proyekt SSSR i razvitiye otechestvennoy geofiziki [The USSR nuclear project and the development of domestic geophysics], *Istoriya nauk o Zemle*, vol. 2, no. 3, pp. 20-33.

Glebovskaya ulitsa i okrestnosti. Institut global'nogo klimata i ekologii v Bogorodske [Glebovskaya street and surroundings. Institute of Global Climate and Ecology in Bogorods] (2022) URL: <https://dzen.ru/a/Y45bkf-DxhILDn7L>.

Kirdin, G.S. (2018) *Vospominaniya. Vtoroy tom. Syn. 50 let v yadernoy geofizike* [Memories. The second volume. Son. 50 years in nuclear geophysics], Publishing house "Kim L.A.", Moscow, Russia, 388 p.

Статья поступила в редакцию (Received): 05.11.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 28.11.2024.

Для цитирования / For citation:

Нахутин, А.И. (2024) К истории ФГБУ ИГКЭ: о здании на Глебовской улице, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 3-4, с. 9-17, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-9-17.

Nakhutin, A.I. (2024) On the history of the Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology: about the building on Glebovskaya Street., *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXV, no. 3-4, pp. 9-17, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-9-17.

Пространственное распределение выбросов метана от стационарных источников сжигания топлива на территории РФ

Л.В. Кудрявцева, Н.С. Попов, В.А. Гинзбург*

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

Адрес для переписки: *kikimo@mail.ru

Реферат. Цель работы – оценка выбросов метана от стационарных источников на территории РФ. На основе данных Росстата о сжигании топлива в различных видах производства и данных спутникового мониторинга о сжигании попутного нефтяного газа на факелах выполнены расчеты с использованием национальных коэффициентов выбросов метана, рекомендуемых в национальных методиках и утвержденных в России. Рассчитаны годовые выбросы метана в 8 Федеральных округах и территориальных образованиях в каждом округе. Определен вклад каждого вида топлива в выбросы метана. Получено пространственное распределение и определены приоритетные источники выбросов метана на территории РФ.

Ключевые слова. Метан, стационарное сжигание, ископаемое топливо.

Spatial distribution of methane emissions from stationary fuel combustion sources on the territory of the Russian Federation

L.V. Kudryavtseva, N.S. Popov, V.A. Ginzburg*

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

Correspondence address: *kikimo@mail.ru

Abstract. The purpose of the work is to estimate methane emissions from stationary sources on the territory of the Russian Federation. Based on Rosstat data on fuel combustion in various types of production and satellite monitoring data on associated petroleum gas flaring, calculations were performed using national methane emission factors recommended in national methodologies and approved in Russia. Annual methane emissions in 8 federal districts and territorial units in each district were calculated. The contribution of each type of fuel to methane emissions

is determined. The spatial distribution was obtained and the priority sources of methane emissions on the territory of the Russian Federation were determined.

Keywords. Methane, stationary combustion, fossil fuels.

Введение

Метан является парниковым газом более сильным, чем углекислый газ, из-за наличия глубоких колебательно-вращательных полос поглощения его молекул в инфракрасном спектре. Однако время жизни метана в атмосфере невелико (от нескольких месяцев до нескольких лет), поскольку он окисляется кислородом до углекислого газа в тропосфере под действием грозových разрядов и в стратосфере под действием УФ-С излучения Солнца. Потенциал глобального потепления (ПГП) метана, который используется в настоящее время для пересчета метана в эквивалент CO_2 , равен 25 (IPCC, 2007). При переходе к отчётности по Парижскому соглашению, уже с 2024 года используемое значение ПГП метана изменится на 28, в соответствии с данными 5-го Оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2013), что приведет к росту оцененного относительного вклада метана в суммарные выбросы парниковых газов. Потенциал глобального потепления метана изменяется в зависимости от источников происхождения: метан из источников ископаемого топлива имеет более высокие значения выбросов (29.8), чем метан из других источников (27.2). Анализ влияния использования различных метрик на оценку вклада метана в выбросы парниковых газов проведен в монографии «Метан и климатические изменения...» (2022).

Метан является основным компонентом природного газа, который используется для производства электроэнергии при сжигании его в газовых турбинах или парогенераторах, подаётся в дома для отопления и приготовления пищи. По сравнению с другими видами углеводородного топлива при сжигании природного газа образуется меньше углекислого газа на единицу произведенного тепла или энергии. Теплота сгорания метана около 891 кДж/моль (или 39 мДж/м³), что ниже, чем у любого другого углеводорода. Сжиженный природный газ (СПГ) так же представляет собой преимущественно метан (CH_4), сжижаемый для удобства хранения и/или транспортировки.

В последние 8-10 лет появилось ряд сообщений о заметном воздействии на климатическую систему короткоживущих климатически активных веществ антропогенного происхождения. К ним в том числе относится и метан. В отличие от долгоживущих парниковых газов (время жизни которых 100 и более лет), короткоживущие парниковые агенты не способны к продолжительной циркуляции в системе атмосфера – океан – экосистемы суши. Поэтому сокращение объема их выбросов может сказаться на их содержании в атмосфере сравнительно быстро – на временных масштабах порядка 10 лет и менее. Считается, что наряду с контролем выбросов диоксида углерода (CO_2), меры по сокращению выбросов короткоживущих парниковых агентов могут снизить антропогенное повышение глобальной температуры еще на 0.5°C к 2050 г. (UNEP, 2021).

Метан входит и в список трех основных парниковых газов, подлежащих контролю согласно Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) (РКИК ООН, 2005). Россия, как и другие развитые страны Приложения 1 регулярно представляют отчеты по выбросам этих веществ в Секретариат РКИК ООН, где эти данные ежегодно проходят международный аудит. Основным методическим документом в рамках отчетности по РКИК являются Руководящие принципы национальных инвентаризаций (МГЭИК, 2006). Информация о выбросах метана ежегодно включается в Национальный доклад о кадастре Российской Федерации (2022). Выбросы метана от источников стационарного сжигания топлива не являются ключевыми источниками национального кадастра, их суммарный вклад в выбросы от сжигания топлива составляет менее 1% от выбросов в секторе Энергетика и 3.3% суммарного выброса метана в стране без учета сектора ЗИЗЛХ.

Целью настоящей работы является оценка сопоставимости и различия между подходами международной и российской методики к расчетам выбросов метана от источников стационарного сжигания топлива и определение их пространственного распределения по регионам России.

Данные и методы

При расчете выбросов метана использовались методические подходы, представленные в Руководящих принципах МГЭИК (2006) по умолчанию, Методических рекомендациях по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации Министерства природных ресурсов и экологии РФ (2015) и в Кадастре выбросов парниковых газов Газпром (2005). В качестве исходных данных для оценки выбросов метана от таких категорий источников, как производство электроэнергии и тепла, производственные отрасли, жилой сектор и сельское хозяйство использованы данные Росстата 2013 г. о расходе различных видов топлива в год. Сравнение коэффициентов эмиссии метана по различным методикам для различных методик по категориям источников и видам топлива представлены в табл. 1.

В категории Стационарное сжигание в отраслях энергетики национальная методика оценки выбросов загрязняющих веществ (Методические рекомендации ..., 2015) предлагает коэффициенты эмиссии метана аналогичные коэффициентам МГЭИК (2006). В Кадастре выбросов (2005) применяются коэффициенты (кг CH_4 на ТДж) 2 вместо 3 для дизельного топлива и 5 вместо 1 для природного газа. Применение более высоких коэффициентов (Кадастр выбросов..., 2005) приводит к увеличению значений выбросов в этой категории в 2-2.5 раза по сравнению с выбросами, рассчитанными по коэффициентам МГЭИК, используемым по умолчанию.

Применение отечественных коэффициентов при расчетах выбросов в категории Стационарное сжигание в производственных отраслях и строительстве приводит к увеличению их значений в 2-3 раза по сравнению с выбросами, рассчитанными по коэффициентам МГЭИК.

Таблица 1. Сравнительная характеристика удельных коэффициентов выбросов метана (кг CH₄ на ТДж) для международных и российских методик

Table 1. Comparative characteristics of specific methane emission factors (kg CH₄ per TJ) for international and Russian methods

Виды топлива / Методики	МГЭИК, 2006	Методические рекомендации ..., 2015	Кадастр выбросов парниковых газов ..., 2005
Стационарное сжигание в отраслях энергетики			
Нефть, мазут	3	3	
Дизельное топливо	3		2
Сжиженный газ, Газ нефтеперерабатывающий, сухой, Антрацит, Коксующийся уголь, Каменный уголь, Бурый уголь, Торф, Угольные брикеты, Кокс металлургический сухой, Газ горючий искусственный коксовый	1		
Природный газ	1	1	5
Промышленные отходы	30	30	
Биомасса. Древесный уголь	200	200	
Древесина/отходы древесины	30	30	
Стационарное сжигание в производственных отраслях и строительстве			
Нефть Дизельное топливо Мазут	3	2	2
Сжиженный газ (природный)	3		
Газ нефтеперерабатывающий, сухой	1		2
Антрацит Коксующийся уголь	10	10	10
Каменный уголь			
Бурый уголь	10	10	10
Торф	2		
Угольные брикеты	1		
Кокс металлургический сухой	10		30
Газ горючий искусственный коксовый	1		10
Природный газ	1	5	5
Промышленные отходы	30	30	
Древесный уголь	200	200	
Древесина/отходы древесины	30	30	30
Топливо печное бытовое	3		300

Продолжение таблицы 1

Виды топлива	Методики	МГЭИК, 2006	Методические рекомендации ..., 2015	Кадастр выбросов парниковых газов ..., 2005
Стационарное сжигание в коммерческой категории				
Нефть. Дизельное топливо. Мазут		10	10	10
Сжиженный газ (нефтяной)		10		5
Газ нефтеперерабатывающий, сухой		5		10
Антрацит. Коксующийся уголь. Каменный уголь. Бурый уголь		10	10	300
Торф		1	10	300
Газ горючий искусственный коксовый		5		
Природный газ		5	5	5
Промышленные отходы Древесина/ отходы древесины		300	300	
Биомасса. Древесный уголь		200	200	
Топливо печное бытовое		10		300
Стационарное сжигание в категории коммунального /сельского/лесного/ рыбного хозяйства и рыбоводства				
Нефть Дизельное топливо. Мазут		10	10	10
Сжиженный газ (нефтяной)				
Газ нефтеперерабатывающий, сухой		5		5
Антрацит Коксующийся уголь Каменный уголь		300	300	10
Бурый уголь. Торф. Угольные брикеты. Кокс металлургический сухой		300	300	
Газ горючий искусственный коксовый		5	5	
Природный газ		5	5	5
Промышленные отходы		300	300	
Бытовые отходы		300		
Биомасса. Древесный уголь		200	200	
Древесина/отходы древесины		300	300	
Топливо печное бытовое		10		300

Стационарное сжигание в категории коммунального /сельского/лесного/рыбного хозяйства и рыбоводства, а также других категорий национальные коэффициенты эмиссии метана не больше, указанных в методических руководящих принципах МГЭИК (2006), а в коммерческой категории даже могут быть ниже.

Для оценки выбросов по регионам России использовались данные о сжигании топлива, приведенные в форме статистической отчетности 4-ТЭР за 2013 год.

Для оценки выбросов от сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) в различных субъектах РФ (табл. 2) привлекались данные спутникового мониторинга (Матвеев и др., 2018; Böttche et al., 2021). Сравнение объемов сжигания ПНГ по данным, используемым в (НДК, 2022) показало, что при одинаковой динамике изменения объемов сжигания (по абсолютным значениям) суммарные объемы сжигания ПНГ, приведенные в кадастре Газпрома (Кадастр выбросов..., 2005) меньше значений, определяемых по спутниковым данным. Уровни сжигания ПНГ в России в 2012-2017 гг. держались на уровне 17-18 млрд м³/год, согласно данным Росстата и «ЦДУ ТЭК», далее отмечалось падение с 17 до 11-12 млрд м³/год.

Таблица 2. Выбросы метана по субъектам Российской Федерации за 2013 г.
(по данным Матвеев и др., 2018; Böttcher et al., 2021)

Table 2. Methane emissions by subjects of the Russian Federation for 2013
(according to Matveev et al., 2018; Bitcher et al., 2021)

Субъекты РФ	% от 15.6 млрд м ³	млн м ³	кг
Пермская обл.	2.2	343.2	4118.4
Оренбургская обл.	7.7	1201.2	14414.4
Самарская обл.	2.5	390	4680
Красноярский край	3.3	514.8	6177.6
Иркутская обл.	10.4	1622.4	19468.8
Томская обл.	6.7	1045.2	12542.4
Ненецкая АО	3.1	483.6	5803.2
Республика Коми	3.3	514.8	6177.6
ХМАО	27.7	4321.2	51854.4
ЯНАО	17.8	2776.8	33321.6
Волгоградская обл.	0.05	7.8	93.6
Республика Адыгея	0.01	1.3	15.6
Ставропольский край	0.11	17.5	210
Республика Башкортостан	7.2	1123	13500
Чеченская Республика	7.6	1185.6	14250

При сжигании на факелах коэффициенты эмиссии метана, рекомендуемые МГЭИК, составляют 0.012 Гг на млн м³ сожженного газа; Российская методика расчета выбросов от факельных установок (Методика расчета..., 1996) дает различные коэффициенты удельных выбросов метана в зависимости от расположения факельных установок и сжигаемой углеводородной смеси:

0.0005 г/г – для горизонтальных высотных установок и некондиционных газовых и газоконденсатных смесей;

0.03 г/г – для наземных установок и некондиционного углеводородного конденсата.

При отсутствии конкретных данных о системах сжигания принималось среднее значение 0.015 г/г, что при средней плотности углеводородной смеси 0.82 кг составляет 0.0123 Гг на млн м³ сожженного газа, и в целом совпадает с данными МГЭИК.

Плотность сжигаемых углеводородов была уточнена по данным об усреднённом составе ПНГ (табл. 3), в расчете которого учитывался состав углеводородной смеси, сжигаемой на крупнейших нефтегазовых месторождениях и газоперерабатывающих заводах Российской Федерации, а также их вклад в общий объём сжигания ПНГ в России (Попов и др., 2021). Оценка плотности производилась по компонентному составу ПНГ по формуле:

$$p_{i,j,y} = X_{i,j,y} \times p_{ci}, \quad (1)$$

где $p_{i,j,y}$ – плотность i -го компонента внутри j -й углеводородной смеси на факельной установке за период y , кг/м³ (рассчитывается согласно ГОСТ 30319.1-1996 и ГОСТ 30319.1-2015);

$X_{i,j,y}$ – молярная доля i -го компонента внутри j -й углеводородной смеси на факельной установке за период y (определяется согласно ГОСТ 30319.1-1996);

p_{ci} – плотность чистого i -го компонента при стандартных условиях, кг/м³ (определяется согласно ГОСТ 30319.1-2015).

Таблица 3. Усреднённый состав ПНГ, сжигаемого на месторождениях Российской Федерации

Table 3. Average composition of APG burned at the deposits of the Russian Federation

Компонент ПНГ	Объём (доля), %
Метан, CH ₄	66.36
Этан, C ₂ H ₆	8.56
Пропан, C ₃ H ₈	10.93
Бутан, C ₄ H ₁₀	6.04
Пентан, C ₅ H ₁₂	2.03
Гексан, C ₆ H ₁₄ +высшие	0.46
Кислород, O ₂	0.05
Азот, N ₂	2.997
Диоксид углерода, CO ₂	0.78
Сероводород, H ₂ S	0.45
Бутилен, C ₄ H ₈	0.18
Прочие (Гелий, Не)	0.78

Полученное значение средневзвешенной плотности ПНГ равно 1.05 кг/м³. Состав природного газа, добываемого в РФ и сжигаемого на факеле, показан в табл. 4.

Таблица 4. Средний примерный состав добываемого природного газа в РФ, %

Table 4. Average approximate composition of produced natural gas in the Russian Federation, %

Компонент	Объем, %
Метан, CH_4	90.4
Этан, C_2H_6	1.7533
Пропан, C_3H_8	0.6599
Бутан, C_4H_{10}	0.2277
Пентан, C_5H_{12}	0.2083
Диоксид углерода, CO_2	0.6621
Азот, N_2	0.7908
Гелий, He	0.235
Сероводород, H_2S	0.1132

Средневзвешенная плотность природного газа, добываемого в РФ и сжигаемого на факеле, составляет 0.68608 кг/м^3 .

Для расчетов выбросов метана при сжигании природного газа на факельной установке российская методика (Методика расчета..., 1996) дает коэффициент 0.0005 г/г или $0.000343 \text{ Гг на млн м}^3$. Принимая во внимание, что объем сжигаемого газа составляет 0.03% от добытого (Dedikov et al., 1999), получаем, что выбросы метана от добытого газа составляют $1.03 \times 10^{-7} \text{ Гг на млн м}^3$, что меньше рекомендаций МГЭИК ($7.6 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-6}$) (ЕМЕП/ЕАОС, 2016; ЕЕА ЕМЕР/ЕЕА, 2019).

Результаты

На рис. 1 представлены абсолютные и относительные значения выбросов метана от стационарных источников сжигания топлива в 2013 г. в различных округах РФ.

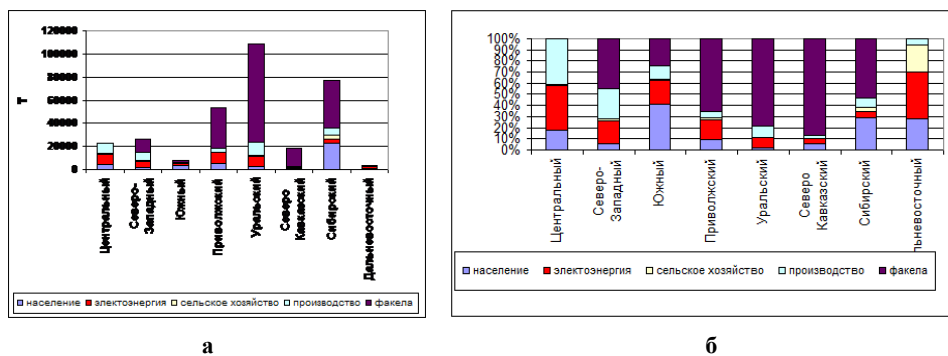


Рисунок 1. Выбросы метана в Федеральных округах РФ, а) в тоннах, б) в %

Figure 1. Methane emissions in Federal Districts of Russia, a) in tons, b) in %

Максимальные выбросы дают Уральский и Сибирский округа, главным образом, за счет сжигания ПНГ. В округах без нефтедобычи максимальные

выбросы обусловлены различными категориями источников: в ЦФО это производство (41%) и электроэнергия 40%, в ДФО электроэнергия (42%) и население 28%, в ЮФО – население 41%.

На рис. 2-9 представлены значения годовых выбросов метана в различных субъектах каждого Федеративного округа.

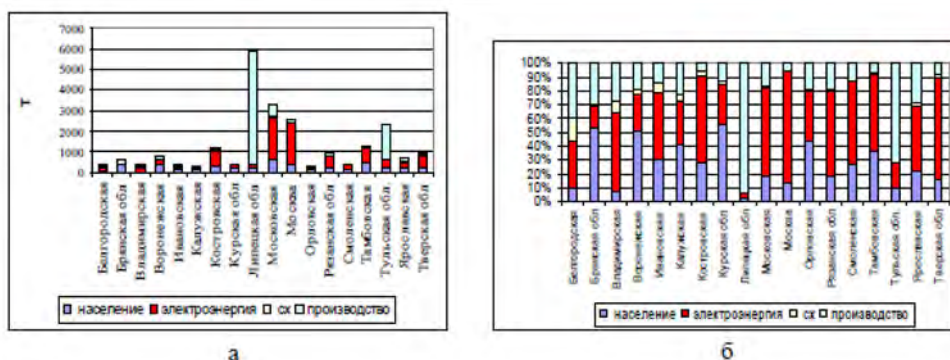


Рисунок 2. Выбросы метана в различных субъектах Центрального ФО, а) в тоннах, б) в %

Figure 2. Methane emissions in various subjects of the Central Federal District, a) in tons, b) in %

Максимальные значения выбросов метана дают Липецкая и Тульская области в основном за счет производства (95% и 70%), а также Москва и Московская область (80% и 60%) в категории Стационарное сжигание в отраслях энергетики.

Вклад каждой топливной группы в суммарные выбросы метана представлен в табл. 5. Максимальные выбросы метана 50-96% дает сжигание газообразного топлива во всех категориях источников, кроме производства, где преобладают выбросы от сжигания твердого топлива (57%). Жидкое топливо существенно только в категории бытовое сжигание 25%. Биомасса дает минимальный вклад 2-14% с преобладанием в категории бытовое сжигание.

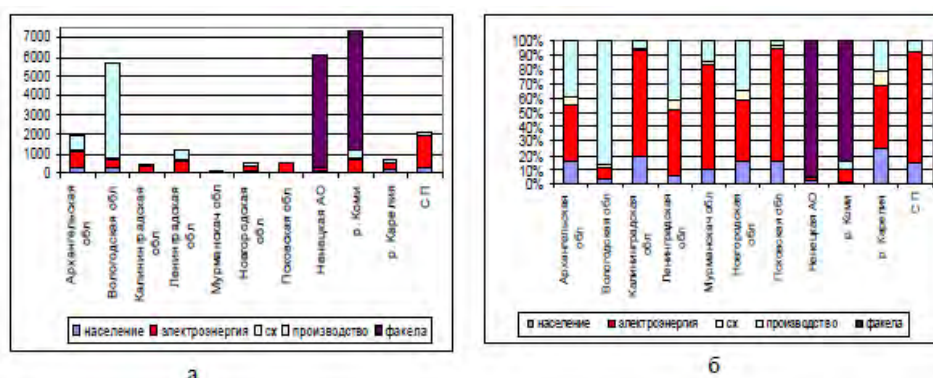


Рисунок 3. Выбросы метана в различных субъектах Северо-западного ФО, а) в тоннах, б) в %

Figure 3. Methane emissions in various subjects of the Northwestern Federal District, a) in tons, b) in %

СЗФО – район нефтедобычи в Ненецкой АО и Республике Коми, выбросы от факелов в этих регионах составляют 85-98% от суммарных. Также существенны выбросы в Вологодской области – 85% в категории бытового сжигания и Санкт-Петербурге – 83% при производстве электроэнергии.

В СЗФО вклад в выбросы метана от сжигания газообразного топлива максимальный в категории производство электроэнергии (68%), твердого топлива – в обрабатывающем производстве (61%), жидкого – при бытовом сжигании (38%), биотоплива – в сельском хозяйстве (70%) (табл. 5).

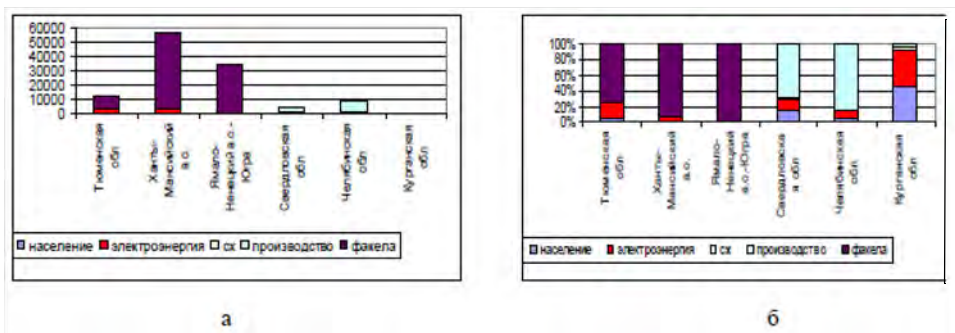


Рисунок 4. Выбросы метана в различных субъектах Уральского ФО, а) в тоннах, б) в %

Figure 4. Methane emissions in various subjects of the Ural Federal District, a) in tons, b) in %

Уральский округ – лидер по объемам добычи нефти. В Тюменской области, Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком округах выбросы метана от факелов составляют 65-100% от суммарных, в других областях преобладают выбросы от производства (85% в Челябинской и 65% в Свердловской областях) и сжигания населением (45% в Курганской области).

В других категориях источников вклад в выбросы метана от сжигания газообразного топлива дает производство электроэнергии – 73%. В обрабатывающем производстве 91% обусловлено сжиганием твердого топлива. Существенен вклад биотоплива – 45-61% в бытовом сжигании и сельском хозяйстве. Сжигание жидкого топлива мало влияет на выбросы метана – 0.5-19%.

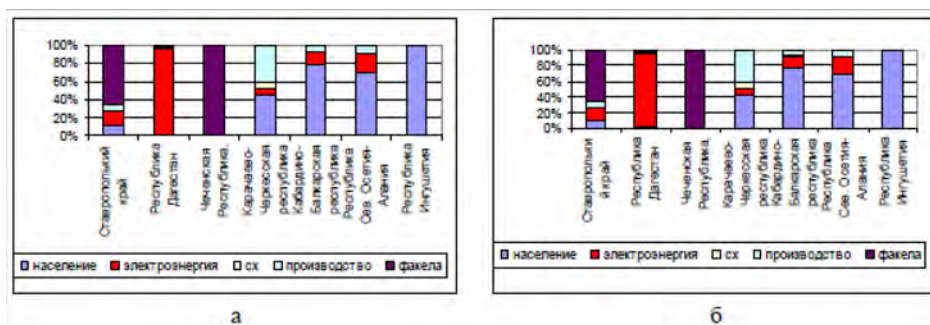


Рисунок 5. Выбросы метана в различных субъектах Северо-Кавказского ФО, а) в тоннах, б) в %

Figure 5. Methane emissions in various subjects of the North Caucasus Federal District, a) in tons, b) in %

Основным источником выбросов метана в Северо-Кавказском ФО являются предприятия нефтяного комплекса в Чеченской Республике, факела которых дают почти 100% от суммарных выбросов. В остальных регионах СКФО преобладают выбросы от сжигания населением 80-100%. Выбросы при производстве электроэнергии наиболее существенны в Республике Дагестан (около 100%)

Кроме факелов, максимальный вклад в выбросы метана вносит твердое топливо в категории обрабатывающее производство – 99.5%. В других категориях существенно преобладают выбросы от сжигания газообразного топлива – 82-99.8%.

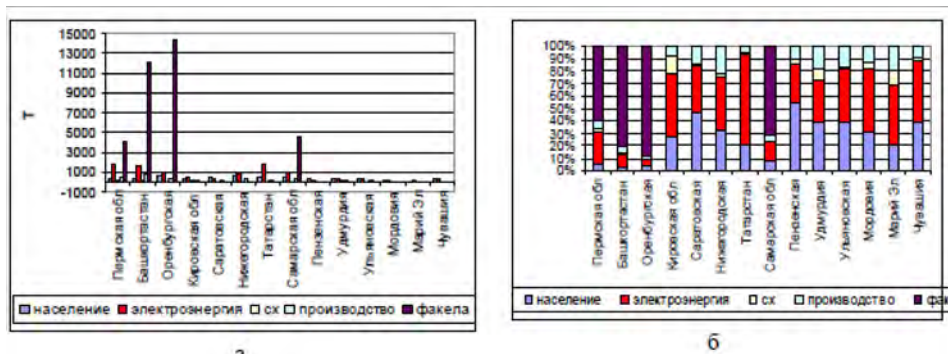


Рисунок 6. Выбросы метана в различных субъектах Приволжского ФО, а) в тоннах, б) в %

Figure 6. Methane emissions in various subjects of the Volga Federal District, in tons, b) in %

Основными источниками выбросов метана в Приволжском ФО являются области нефтедобычи – Оренбургская (90% от суммы), Самарская и Пермская область (60%), Республика Башкортостан (80%). В других областях преобладают выбросы от производства электроэнергии (до 95% в Татарстане) и бытовое сжигание (20-50%).

Среди топливных групп (табл. 5) максимальные выбросы метана дает сжигание газообразного топлива – 66-94% во всех категориях источников, кроме сельского хозяйства, где преобладают выбросы от сжигания биотоплива – 70%.

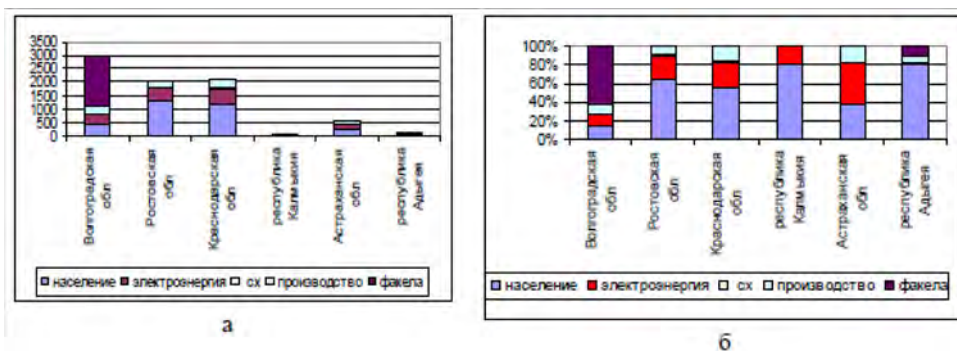


Рисунок 7. Выбросы метана в различных субъектах Южного ФО, а) в тоннах, б) в %

Figure 7. Methane emissions in various subjects of the Southern Federal District, a) in tons, b) in %

Выбросы метана в Южном ФО невелики и составляют 2.5% от суммарных. Максимальные выбросы в Волгоградской (75% от факелов), Ростовской (60%) областях и Краснодарском крае (55%) в категории бытовое сжигание.

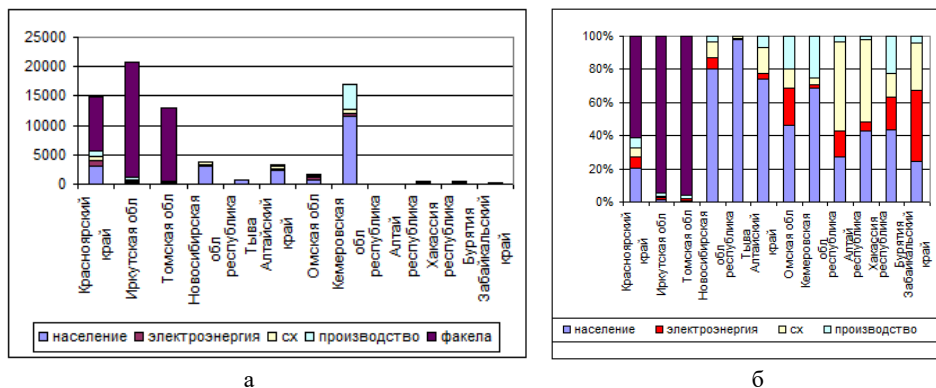


Рисунок 8. Выбросы метана в различных субъектах Сибирского ФО, а) в тоннах, б) в %

Figure 8. Methane emissions in various subjects of the Siberian Federal District, a) in tons, b) in %

В Сибирском ФО основными источниками выбросов метана являются нефтедобывающие регионы: Иркутская, Томская области и Красноярский край (60-100% от суммарных выбросов). В других регионах наибольший вклад в выбросы дает бытовое сжигание: до 98% в Тыве, 75% в Алтайском крае и 70% в Кемеровской области.

Выбросы метана обусловлены главным образом сжиганием твердого топлива 79-92% во всех категориях, кроме обрабатывающего производства, где к ним добавляется жидкое топливо 34% и древесина 31%.

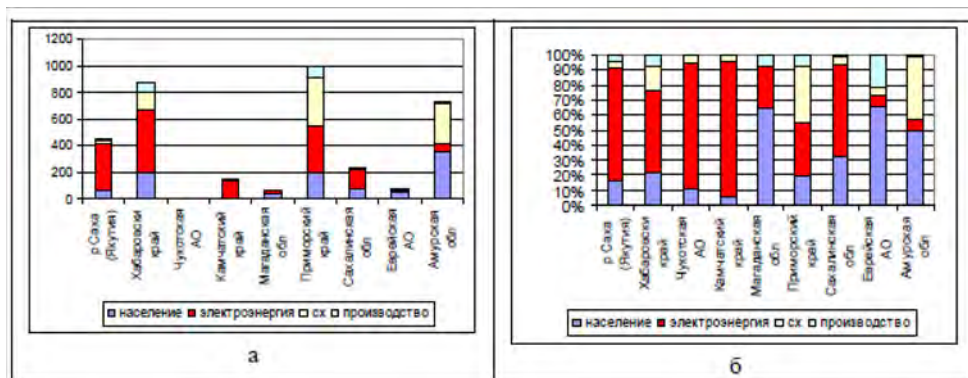


Рисунок 9. Выбросы метана в различных субъектах Дальневосточного ФО, а) в тоннах, б) в %

Figure 9. Methane emissions in various subjects of the Far Eastern Federal District, in tons, b) in %

В Дальневосточном ФО основным источником выбросов метана является производство электроэнергии (35-85%) и, соответственно, сжигание газообразного топлива (54%) (табл. 5). В другие категории источников основной вклад вносит твердое топливо (60-77%).

Таблица 5. Вклад каждой топливной группы в суммарные выбросы, %

Table 5. Contribution of each fuel group to total emissions, %

Категория источника	Жидкое топливо	Твердое топливо	Газообразное топливо	Биотопливо
Центральный ФО				
Производство электроэнергии и тепловой энергии	0.5	1	96	2.5
Обрабатывающие производства	0.5	67	32	0.5
Бытовое сжигание	25	12	49	14
Сельское хозяйство, рыболовство	3	12	82	3
Северо-Западный ФО				
Производство электроэнергии и тепловой энергии	2	2	68	28
Обрабатывающие производства	2	61	29	3
Бытовое сжигание	38	15	19	28
Сельское хозяйство, рыболовство	1	19	10	70
Уральский ФО				
Производство электроэнергии и тепловой энергии	1	73	26	
Обрабатывающие производства	0.5	5.5	91	3
Бытовое сжигание	19	4	32	45
Сельское хозяйство, рыболовство	0.5	20.5	18	61
Северо-Кавказский АО				
Производство электроэнергии и тепловой энергии	0.2	0	99.8	0
Обрабатывающие производства	0.3	99.5	0.2	0
Бытовое сжигание	5	3	90	2
Сельское хозяйство, рыболовство	6	4	82	8
Приволжский ФО				
Производство электроэнергии и тепловой энергии	0.2	0.3	94	5.5
Обрабатывающие производства	4.5	8	86	1.5
Бытовое сжигание	17	3	66	14
Сельское хозяйство, рыболовство	1	8	21	70

Продолжение таблицы 2

Категория источника	Жидкое топливо	Твердое топливо	Газообразное топливо	Биотопливо
Южный ФО				
Производство электроэнергии и тепловой энергии	0.2	4.7	95	0.1
Обрабатывающие производства	1	5.7	93.3	0
Бытовое сжигание	20	19	60	1
Сельское хозяйство, рыболовство	11	38	40	11
Сибирский ФО				
Производство электроэнергии и тепловой энергии	34	35	31	0
Обрабатывающие производства	1	79	19	1
Бытовое сжигание	2	92	1	5
Сельское хозяйство, рыболовство	2	92	1	5
Дальневосточный ФО				
Производство электроэнергии и тепловой энергии	9	21	54	16
Обрабатывающие производства	4	58	36	2
Бытовое сжигание	17	62	8	13
Сельское хозяйство, рыболовство	0.2	77	0.2	22.6

Сжигание твердого топлива дает максимальные выбросы черного углерода при производстве электро- и тепловой энергии (40 %). Так же около 40% вносит сжигание твердого топлива в категориях обрабатывающие производства и бытовое сжигание, а в категории коммунальные услуги – 30%. Жидкое топливо вносит наибольший вклад в выбросы в категориях: другие источники выбросов, обрабатывающие производства, коммунальные услуги и сельское хозяйство (53-63%). Вклад выбросов от газообразного топлива существенный только для категории централизованное производство тепло- и электроэнергии. Биотопливо вносит существенных вклад в категориях бытовое сжигание и сельское хозяйство (36-49%).

На рис. 10 представлено пространственное распределение выбросов метана на территории РФ от разных категорий источников.

Из представленного рисунка видно, что максимальные выбросы метана дают Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий АО, а плотность выбросов наибольшая в Европейской части. Это соответствует результатам базы данных EDGAR (EC-JRC/PBL, 2012), согласно которым максимальное значение выбросов в районе Санкт-Петербурга составляет 8 т/км², в Архангельской области

0.05 т/км², в Ямало-Ненецком АО 0.06 т/км², что вполне отвечает нашим расчетам, соответственно, 1.5, 0.07 и 0.05 т/км².

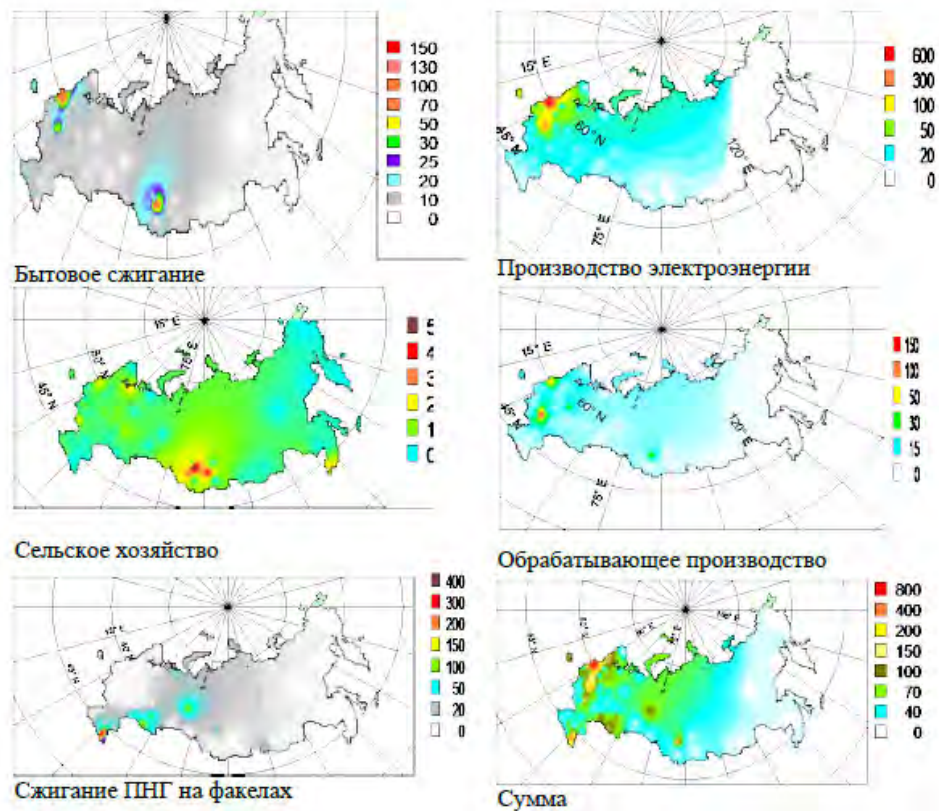


Рисунок 10. Пространственное распределение выбросов метана (кг/км²) на территории РФ от разных категорий источников

Figure 10. Spatial distribution of methane emissions (kg/km²) on the territory of the Russian Federation from different source categories

Выводы

Расчеты выбросов метана от стационарных источников на территории РФ показали, что основным их источником является сжигание попутного нефтяного газа на факелах в районах нефтедобычи, поэтому максимальные выбросы дают Уральский (110 тыс. т) и Сибирский (80 тыс. т) федеральные округа. В округах без нефтедобычи максимальные выбросы обусловлены различными категориями источников: в ЦФО это сжигание в отраслях производства (41%) и энергетики (40%), в ДФО – сжигание в отраслях энергетики (42%) и бытовое сжигание (28%), в ЮФО – бытовое сжигание (41%).

Определен вклад каждой топливной группы в суммарные выбросы метана. Максимальные выбросы метана (50-96%) дает сжигание газообразного топлива во всех категориях источников, кроме производства, где преобладают выбросы от сжигания твердого топлива (57%). Вклад в выбросы метана жидкого топлива существенен только в категории бытовое сжигание

(25%). Биомасса дает минимальный вклад – 2-14% с преобладанием в категории бытовое сжигание.

Полученные результаты предоставляют широкие возможности для комплексного анализа загрязнения территории России и разработки мер по снижению негативного воздействия.

Список литературы

ГОСТ 30319.1 (1996) *Межгосударственный стандарт. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки*, М., ИПК Изд-во стандартов, 20 с.

ГОСТ 30319.1 (2015) *Межгосударственный стандарт. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки. Общие положения*, М., ИПК Изд-во стандартов, 20 с.

ЕМЕП/ЕАОС (2016) *Руководство ЕМЕР/ЕАОС по инвентаризации выбросов. Общие руководящие указания по подготовке национальных инвентаризационных выбросов*, ЕАОС, Копенгаген, 37 с.

Кадастр выбросов парниковых газов (2005) Общие требования к содержанию и оформлению, СТО Газпром.

Матвеев, А.М., Жижин, М.Н., Пойда, А.А. (2018) Применение алгоритма спутникового мониторинга сжигания попутного нефтяного газа Viirs Nightfire на территории России и его результаты, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, сб. тезисов докладов 16 Всероссийской открытой конф.*, с. 100.

МГЭИК (2006) *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов Межправительственной группы экспертов по изменению климата*, Под ред. С. Игглестона, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара и К. Танабе, т. 1-5, ИГЕС, Хайяма.

Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты (2022) под ред. Б.Г. Бандура, И.И. Мохова, Макоско, М., РАН, 388 с.

Методика расчета параметров выбросов и валовых выбросов вредных веществ от факельных установок сжигания углеводородных смесей (1996) Москва, ВНИИГаз.

Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации (2015) Утв. Министерством природных ресурсов и экологии РФ от 16 апреля 2015 г, № 15-р, 716 с.

НДК (2022) *Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2020 гг.*, Москва, с. 58-61.

Попов, Н.В., Говор, И.Л., Гитарский, М.Л. (2021) Эмиссия парниковых газов от сжигания попутного нефтяного газа в России, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 54-61.

РКИК ООН (2005) *Рамочная Конвенция ООН об изменении климата. Секретариат РКИК ООН при поддержке Отделения ООН в Женеве*, Женева, 41 с.

Böttcher Kristin, Ville-Veikko Paunu, Kaarle Kupiainen, Mikhail Zhizhin, Alexey Matveev, Mikko Savolahti, Zbigniew Klimont, Sampsa Väätäinen, Heikki Lamberg, Niko Karvosenoja (2021) *Black carbon emissions from flaring in Russia in the period 2012-2017*.

Dedikov, J.V., Akopova, G.S., Gladkaja, N.G., Piotrovskij, A.S., Markellov, V.A., Salichov, S.S., Kaesler, H., Ramm, A., Muller von Blumencron, A., Lelieveld, J. (1999) Estimating Methane Releases from Natural Gas Production and Transmission in Russia, *Atmospheric Environment*, no. 33, pp. 3291-3299.

EC-JRC/PBL (2012) *Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR)*, release EDGARv4.2 FT2012, available at: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu> (last access: 15 January 2018).

EEA EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (2019) European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, available at: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>.

IPCC (2007) *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

UNEP (2021) *Emissions Gap Report 2021. The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered*, Nairobi, available at: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2021>.

References

GOST 30319.1 (1996) *Mezhdgosudarstvennyj standart. Gaz prirodnyj. Metody rascheta fizicheskix svojstv. Opredelenie fizicheskix svojstv prirodnogo gaza, ego komponentov i produktov ego pererabotki* [Interstate standard. Natural gas. Methods for calculating physical properties. Determination of the physical

properties of natural gas, its components and products of its processing], IPK Publishing House of Standards, Moscow, Russia, 20 p.

GOST 30319.1 (2015) *Mezhhgosudarstvennyj standart. Gaz prirodnyj. Metody rascheta fizicheskix svojstv. Opredelenie fizicheskix svojstv prirodnogo gaza, ego komponentov i produktov ego pererabotki* [Interstate standard. Natural gas. Methods for calculating physical properties. Determination of the physical properties of natural gas, its components and products of its processing], IPK Publishing House of Standards, Moscow, Russia, 20 p.

ЕМЕР/EAOS (2016) *Rukovodstvo EMER/EAOS po inventarizacii vybrosov 2016. Obshchie rukovodyashchie ukazaniya po podgotovke nacional'nyh inventarizacionnyh vybrosov* [Guidelines for Emission Inventories 2016. General guidelines for the preparation of national emission inventories], Kopenhagen, Denmark.

Kadastr vybrosov parnikovyh gazov. Obshchie trebovaniya k sodержaniyu i oformleniyu [Inventory of greenhouse gas emissions. General requirements for content and design] (2005) STO Gazprom, Russia.

Matveev, A.M., Zhizhin, M.N., Pojda, A.A. (2018) *Primenenie algoritma sputnikovogo monitoringa szhiganiya poputnogo neftyanogo gaza Viirs Nightfire na territorii Rossii i ego rezul'taty* [Application of the Viirs Nightfire associated petroleum gas flaring satellite monitoring algorithm in Russia and its results], *Sbornik tezisev dokladov Shestnadcatoj vsrossijskoj otkrytoj konferencii «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»*, [Modern problems of remote sensing of the Earth from space, collection of abstracts of reports of the 16th All-Russian open conference], Russia, p. 100.

MGEIK (2006) *Rukovodyashchie principy nacional'nyh inventarizacij parnikovyh gazov Mezhpriavitel'stvennoj gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata* [Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories of the Intergovernmental Panel on Climate Change], in S. Igglestona, L. Buendia, K. Miva, T. Ngara, K. Tanabe (eds.), vol. 1-5, IGES, Hajyama.

Metan i klimaticheskie izmeneniya: nauchnye problemy i tekhnologicheskie aspekty (2022) [Methane and climate change: scientific problems and technological aspects], in B.G. Bandura, I.I. Mohova, A.A. Makosko (eds.), Rossijskaya akademiya nauk, Russia.

Metodika rascheta parametrov vybrosov i valovyh vybrosov vrednyh veshchestv ot fakel'nyh ustanovok szhiganiya uglevodorodnyh smesej [Methodology for calculating the parameters of emissions and gross emissions of harmful substances from flare installations for the combustion of hydrocarbon mixtures] (1996), VNIlgaz, Moscow, Russia.

Metodicheskie rekomendacii po provedeniyu dobrovol'noj inventarizacii ob"ema vybrosov parnikovyh gazov v sub"ektah Rossijskoj federacii [Methodological recommendations for conducting a voluntary inventory of greenhouse gas emissions in the subjects of the Russian Federation] (2015) Utv. Ministerstvom prirodnyh resursov i ekologii RF ot 16 aprelya 2015 g., no. 15-r, 716 p.

Nacional'nyj doklad o kadastrе antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov. ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom za 1990-2020 gg. (2022) [National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases. not regulated by the Montreal Protocol for 1990-2020], Moscow, Russia, pp. 58-61.

Popov, N.V., Govor, I.L., Gitarskij, M.L. (2021) Emissiya parnikovyh gazov ot szhiganiya poputnogo neftyanogo gaza v Rossii [Greenhouse gas emissions from associated petroleum gas flaring in Russia], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 54-61.

RKIK OON (2005) *Ramochnaya Konvenciya OON ob izmenenii klimata. Sekretariat RKIK OON pri podderzhke Otdeleniya OON v Heneve* [United Nations Framework Convention on Climate Change. UNFCCC Secretariat with the support of the United Nations Office at Geneva], Geneva, Switzerland, 41 p.

Böttcher Kristin, Ville-Veikko Paunu, Kaarle Kupiainen, Mikhail Zhizhin, Alexey Matveev, Mikko Savolahti, Zbigniew Klimont, Sampsa Väättäinen, Heikki Lamberg, Niko Karvosenoja (2021) *Black carbon emissions from flaring in Russia in the period 2012-2017*.

Dedikov, J.V., Akopova, G.S., Gladkaja, N.G., Piotrovskij, A.S., Markellov, V.A., Salichov, S.S., Kaesler, H., Ramm, A., Muller von Blumencron, A., Lelieveld, J. (1999) Estimating Methane Releases from Natural Gas Production and Transmission in Russia, *Atmospheric Environment*, no. 33, pp. 3291-3299.

EC-JRC/PBL (2012) *Emission Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR), release EDGARv4.2 FT2012, available at: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu> (last access: 15 January 2018).

EEA EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (2019) European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, available at: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>.

IPCC (2007) *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

UNEP (2021) *Emissions Gap Report 2021. The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered*, Nairobi, available at: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2021>.

Поступила в редакцию:

Доработана после рецензирования:

Для цитирования / For citation:

Кудрявцева, Л.В., Попов, Н.С., Гинзбург, В.А. (2024) Пространственное распределение выбросов метана от стационарных источников сжигания топлива на территории РФ, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 3-4, с. 18-37, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-18-37.

Kudryavtseva, L.V., Popov, N.S., Ginzburg, V.A. (2024) Spatial distribution of methane emissions from stationary fuel combustion sources on the territory of the Russian Federation, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXV, no. 3-4, pp. 18-37, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-18-37.

Воздействие климатических факторов на состояние модельных древостоев Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника

Шерстнева Е.А.^{1, 2)}, Максимова О.В.^{1, 3)}, Кухта А.Е.^{1)*}, Тихонова И.О.²⁾

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

²⁾Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,
Россия, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1

³⁾Университет МИСИС,
Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4

*Адрес для переписки: anna_koukhtha@mail.ru

Реферат. На материале модельных древостоев ели европейской *Picea abies* (L.) Karst и сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. стационара Международной совместной программы комплексного мониторинга влияния загрязнения воздуха на экосистемы (МСП КМ), расположенного на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника, выполнена оценка отклика деревьев на воздействие климатических и гидрологических факторов. При сборе натурных данных использованы методы биоиндикации. Статистическая обработка полученного материала проводилась с использованием пакета *Excel 2016*. Для выявления связей между рядами параметров состояния крон деревьев и значений абиотических компонентов биогеоценозов применялся корреляционный анализ. Обнаружено, что лимитирующими факторами для развития фотосинтезирующего аппарата хвойных пород в регионе являются количество осадков и уровень вод водоёмов и водотоков. Сделан вывод о необходимости учитывать параметры местообитаний и факторы, лимитирующие развитие деревьев при осуществлении мониторинга загрязнения природных экосистем.

Ключевые слова. Ель европейская, сосна обыкновенная, дефолиация, депигментация, лесные экосистемы, климатические факторы, осадки, уровень вод.

The impact of climatic factors on the state of model stands of the Central Forest state natural biosphere reserve

Sherstneva E.A.^{1, 2)}, Maksimova O.V.^{1, 3)}, Koukhtha A.E.^{1)*}, Tikhonova I.O.²⁾

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

²⁾Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
9, Miusskaya square, 125047, Moscow, Russian Federation

Abstract. Based on the material of model stands of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst and Scots pine *Pinus sylvestris* L. of the site of the International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems (ICP IM), located on the territory of the Central-Forest State Natural Biosphere Reserve, the response of trees to the impact of climatic and hydrological factors was assessed. Bioindication methods were used to collect field data. Statistical processing of the obtained material was carried out using Excel 2016 package. Correlation analysis was used to identify relationships between the series of tree crown condition parameters and values of abiotic components of biogeocenoses. It was found that the limiting factors for the development of photosynthetic apparatus of coniferous species in the region are the amount of precipitation and water content of water bodies and watercourses. It is concluded that it is necessary to take into account habitat parameters and limiting factors limiting the development of bioindicators when monitoring the pollution of natural ecosystems.

Keywords. European spruce, Scots pine, defoliation, depigmentation, forest ecosystems, climatic factors, precipitation, water availability.

Введение

В последние десятилетия вследствие изменений климата и антропогенного загрязнения окружающей среды задача оценки и прогнозирования состояния лесных экосистем приобретает всё большую актуальность. В Российской Федерации для решения этой проблемы наряду с другими национальными и международными проектами выполняется Международная совместная программа комплексного мониторинга влияния загрязнения воздуха на экосистемы (МСП КМ), выполняемая под эгидой Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния Экономической комиссии ООН для Европы.

В Российской Федерации координатором и исполнителем МСП КМ является ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (ИГКЭ), в котором организован Национальный научно-координационный центр (ННКЦ) программы, в обязанности которого входит сбор и обработка первичного материала, собранного на сети стационаров, а также представление результатов в международный центр данных (Уппсала, Швеция) (<http://www.igce.ru/performance/international/icp-im/>). Стационары сети МСП КМ на территории России расположены на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) федерального и регионального значения.

Для корректной оценки состояния природных биоценозов и успешного прогнозирования его изменений необходимо разрабатывать методы в рамках методологии МСП КМ, позволяющие определять факторы, лимитирующие рост и развитие биологических объектов, а также выявлять последствия как

антропогенных, так и природных воздействий на экосистемы. Для обнаружения указанных закономерностей Руководством по комплексному мониторингу (Руководство..., 2013) рекомендуются методы биоиндикации (в частности, по степени дефолиации и депигментации листвы/хвои деревьев).

В рамках решения данной проблемы ранее на территории стационара МСП КМ, расположенного в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике (ЦЛГЗ), были проведены работы по определению откликов модельных древостоев на поступление ряда химических соединений с трансграничным атмосферным переносом (Кухта, Пчелкин, Полещук, 2018).

Анализ связи рядов значений дефолиации и депигментации хвойных пород (показателей состояния фотосинтезирующего аппарата деревьев) и выпадений химических соединений, попадающих в экосистемы заповедника вследствие трансграничного переноса, позволил предположить, что значимый негативный эффект воздействия на экосистемы заповедника отсутствует. Для дефолиации *Pinus sylvestris* L. получены значимые отрицательные корреляции с некоторыми химическими соединениями, которые говорят о возможном положительном воздействии соединений, попадающих на территорию заповедника с трансграничным переносом, на состояние крон сосняков (Кухта, Пчелкин, Полещук, 2018). Такие результаты, скорее всего, связаны с бедностью почв местообитаний сосны, для древостоев которой дополнительные поступления соединений азота, серы и т.д. играют роль удобрений (макро- и микроэлементов). Для ели европейской *Picea abies* (L.) Karst. значимых корреляций дефолиации и депигментации с выпадениями химических веществ не обнаружено. Ель же обитает на более богатых субстратах и не испытывает дефицита указанных соединений (Кухта, Пчелкин, Полещук, 2018).

Таким образом, усиление дефолиации и депигментации крон рассматриваемых пород, наиболее вероятно, не связано с выпадениями химических соединений, попадающих на территорию ЦЛГЗ с трансграничным переносом, а может быть частью отклика на воздействие именно региональных экологических (в частности, климатических и гидрологических) факторов в рассматриваемых биогеоценозах, а не трансграничного загрязнения. Целью данной работы является выявление связей между параметрами состояния крон деревьев и метеопараметрами (температурами, суммами осадков), а также уровней воды водотоков и водоемов территории.

Методы и материалы

Исследования проводились на стационаре МСП КМ, заложенном на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (56°26' в.д., 56°31' с. ш). По климатическому районированию Б.П. Алисова заповедник расположен в атлантико-континентальной лесной области, юго-западной подобласти умеренного пояса (Алисов, 1956). Территория характеризуется положительным балансом влаги, (гидротермический



Figure 1. Location map of the CFSR (<https://clgz.ru>)

Пробная площадь № 2 (56°27'425" с.ш., 32°57'584" в.д.) размещена в межрядовой котловине, в сосняке сфагновом, характеризующимся IV-V классами бонитета (см. рис. 3). Сомкнутость составляет 0.1-0.2. В кустарничково-травянистом ярусе преобладают пушица *Eriophorum vaginatum* L., багульник *Ledum palustre* L., голубика *Vaccinium uliginosum* L., морошка *Rubus chamaemorus* L., клюква *Vaccinium oxycoccus* L.



Рисунок 2. Пробная площадь № 1, ель обыкновенная *P. abies*, водоохранная зона р. Межа
Figure 2. Sample area No. 1, common spruce *P. abies*, water protection zone of the river Mezha



Рисунок 3. Пробная площадь № 2, сосна обыкновенная *P. sylvestris*,
окраина болота Старосельский мох

Figure 3. Sample area No. 2, common pine *P. sylvestris*, the outskirts of the marsh Staroselsky moss

Оценка состояния модельных древостоев проводилась методом биоиндикации по степени дефолиации и депигментации листвы/хвои деревьев. Указанные параметры определялись по методике, представленной в Руководстве (Руководство..., 2013). Оценка дефолиации (потери листвы/хвои в изучаемой кроне в сравнении с воображаемым, полностью покрытым листвой/хвоей деревом той же породы) и депигментации (отклонение от обычной окраски живой листвы/хвои рассматриваемых пород) осуществляется визуально, с шагом 5%.

Измерения на пробных площадях проводились ежегодно, в августе-сентябре, начиная с 2009 г. Для анализа использован ряд данных за 2009-2022 гг.

Для анализа связей рядов дефолиации и депигментации с метеопараметрами были использованы массивы измерений температур воздуха и осадков двух метеостанций: метеостанция Тверского центра гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды «Лесной заповедник», метеорологическая станция II разряда «Торопец» (М-II Торопец) (Булыгина, Разуваев, Александрова, 2014, Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942). Необходимость использования двух источников метеоданных объясняется неполнотой рядов температур, измеренных на метеостанции «Лесной заповедник». Метеостанция «Торопец» отделена от стационара расстоянием, равным около 100 км (по прямой), но обе метеостанции находятся в одной климатической области – в атлантико-континентальной европейской области умеренного пояса. На рис. 4 представлены ряды суммарных осадков вегетационных сезонов по обоим станциям, на основании сходств которых тем более возможно судить и о сходстве измеренных на них температурах. Применялись средние показатели за вегетационный сезон (апрель-сентябрь) для температур и суммарные показатели по выпадениям осадков за указанный период.

Старосельский мох – верховое болото в Нелидовском районе в Тверской области площадью 617 га. Болото является водораздельным, естественным и ненарушенным. Из его западной части вытекает р. Межа – приток р. Западная Двина, а из восточной части – р. Тудовка, приток р. Волги.

Река Межа – основная водная артерия Нелидовского округа Тверской области, является одной из крупных рек ЦЛГЗ, её длина – 259 км (в т.ч. 44.44 км в пределах ООПТ), площадь бассейна – 9080 км².

Сотрудниками заповедника ежегодно проводятся измерения значений уровня воды реки Межа и уровня вод болота Старосельский мох. Результаты размещаются в открытом доступе в Летописях природы на сайте ЦЛГЗ (<https://clgz.ru/node/19216>). Для 2009-2022 гг. была рассчитана ежегодная сумма осадков за вегетационный сезон (апрель-сентябрь), т.к. именно в указанный период у деревьев происходят основные физиологические процессы.

Пробная площадь 1 с древостоем ели расположена на водосборе р. Межа, а пробная площадь 2 с древостоем сосны – на окраине болота Старосельский мох. Следовательно, проводились сравнения рядов параметров состояния крон ели и уровня воды р. Межа, а также состояния крон сосны и уровня вод болота Старосельский мох.



Рисунок 4. Суммы осадков вегетационных сезонов, измеренных на метеостанциях «М-II Торопец» и «Лесной заповедник»

Figure 4. Precipitation totals of the growing seasons measured at the meteorological stations "M-II Toropets" and "Forest Reserve"

Связь динамик рядов значений дефолиации и депигментации деревьев от температур, осадков и уровней вод р. Межа и болота Старосельский мох оценивались методом корреляционного анализа (определялся коэффициент Пирсона). Данные операции производились с помощью пакета *Excel 2016*. Графические материалы также были разработаны с помощью указанного пакета.

Результаты и обсуждение

Для выявления отклика параметров состояния крон сосны и ели на воздействие факторов среды привлекались ряды средних температур, сумм осадков, средних уровней вод р. Межа и болота Старосельский мох текущего и предыдущего вегетационных сезонов. Анализ рядов абиотических данных за предшествующий год необходим, так как именно в этот период закладываются почки возобновления, обеспечивающие развитие кроны на следующий год (Кухта, 2009; Максимова, Кухта, 2022; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Gavrikov, Karlin, 1993).

Результаты корреляционного анализа связи дефолиации и депигментации ели и сосны на пробных площадях со средними температурами, суммами осадков и средними значениями уровней вод за текущий вегетационный сезон представлены в табл. 1, а в табл. 2 – со средними значениями предыдущего вегетационного сезона (корреляция $r = 0.46$ – статистически значима¹⁾, на уровне 10% (Большев, Смирнов 1983); в таблице выделены близкие к это-

¹⁾Проверка статистической значимости по критерию Пирсона проводилась в предположении нормального распределения рассматриваемых признаков, проверка которой затруднена на малых выборках. Однако, авторами проводилась такая проверка на больших массивах заповедника «Полярный круг», которая дала положительные результаты. Ввиду этого, в настоящем исследовании полученные результаты экстраполированы на показатели модельных древостоев ЦЛГЗ.

му значения). Как было указано выше, модельный древостой ели (пробная площадь 1) размещен рядом с р. Межа, а модельный древостой сосны (пробная площадь 2) – на окраине болота Старосельский мох. Следовательно, выявлялись корреляции параметров состояния крон ели и значений уровня вод р. Межа, а также сосны и значений уровня вод болота Старосельский мох. Между уровнем вод болота Старосельский мох, где произрастает сосна, и суммарными осадками как текущего, так и предшествующего, вегетационных сезонов выявлена заметная положительная корреляционная связь. Следовательно, уровень воды гидрографической сети, включающей болото, связан в значительной степени с количеством осадков текущего и предыдущего года, которые аккумулируются в водоемах и водотоках и определяют гидрологический режим территории в текущем вегетационном сезоне. Тем самым определяется характер развития крон сосны в текущем году и её возможности адаптации к доступности почвенной влаги. Таким образом, для выявления самостоятельной связи дефолиации и депигментации сосны с суммарными осадками и уровнем вод болота рассчитывались частные коэффициенты корреляции²⁾ (в табл. 1, 2 имеют пометку «частный»).

Таблица 1. Коэффициенты корреляции (r), характеризующие связи средних по пробным площадям значений дефолиации и депигментации древостоев и климатических факторов, а также уровня вод текущего вегетационного сезона (выделены близкие к значимым на уровне 10% коэффициенты)

Table 1. Correlation coefficients (r) characterizing relationships between average values of stands defoliation and depigmentation and climatic factors, as well as water level of the current growing season (close to significant at 10% coefficients are highlighted)

Параметр состояния кроны	Суммы осадков, мм	Средние температуры, t°	Средний уровень вод, см
Дефолиация ели	-0.41	-0.14	0.08
Депигментация ели	-0.33	-0.10	0.00
Дефолиация сосны	-0.11 (частный)	0.03	0.20 (частный)
Депигментация сосны	-0.40 (частный)	0.03	0.40 (частный)

²⁾ Частные коэффициенты корреляции характеризуют тесноту связи между результирующей переменной и рассматриваемым фактором при устранении влияния других факторов, что позволяет оценить самостоятельный вклад соответствующей переменной. В работе для выявления связи дефолиации и депигментации с суммами осадков исключалось влияние уровня вод болота, а для выявления связи с уровнем вод болота исключалось влияние сумм осадков.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (r), характеризующие связи средних по пробным площадям значений дефолиации и депигментации древостоев, а также климатических факторов и уровня вод предыдущего вегетационного сезона (выделены близкие к значимым на уровне 10% коэффициенты)

Table 2. Correlation coefficients (r) characterizing the relationships between the average values of stands defoliation and depigmentation, as well as climatic factors and water level of the previous growing season (close to significant at 10% coefficients are highlighted)

Параметр состояния кроны	Суммы осадков, мм	Средние температуры, t°	Средний уровень вод, см
Дефолиация ели	-0.05	0.00	0.46
Депигментация ели	-0.19	-0.27	0.32
Дефолиация сосны	-0.39 (частный)	0.13	-0.06 (частный)
Депигментация сосны	-0.18 (частный)	0.38	-0.13 (частный)

На основании полученных результатов можно предположить наличие связи степени дефолиации ели и сумм осадков текущего вегетационного сезона ($r = -0.41$). Заметим, что, хотя эта корреляция и незначима формально, но знак и величина корреляции с другим показателем – депигментацией – имеет тот же знак и значительную величину, что подтверждает наличие связи между биологическими показателями и климатическим фактором; то же можно заметить и в других аналогичных случаях: уровень вод – состояние ели; осадки – состояние сосны. Важно отметить, что, помимо этого, дополнительно для ели обнаружена отрицательная связь сумм осадков текущего периода с *максимальными* годовыми показателями депигментации и дефолиации ($r = -0.48$ – статистически значим, $r = -0.44$ – близок к статистически значимому, не представлены в табл. 1). На рис. 5а, б представлены графики синхронности динамики указанных параметров. Как для показателя дефолиации, так и для показателя депигментации выделяются периоды асинхронности: на рис 5а асинхронность³⁾ составляет 75%, на рис. 5б – 58%. В ряде ранее проведенных исследований показано, что лимитирующим фактором для бореальных сосняков является не температура воздуха (теплом они в достаточной степени обеспечены), а количество осадков (Максимова, Кухта, 2022; Кухта, 2009; Кухта, Попова, 2020; Кузнецова, Чернокульский, Кухта, 2020; Chernogaeva, Kuznetsova, Kukhta, 2020). Во влажных биотопах таёжных экосистем недостаток воды объясняется явлением физиологической сухости, связанной с низкой температурой почвы, низким значением pH среды корнеобитаемого слоя, недостатком в ней кислорода. Таким образом, повышение температуры вызывает дополнительную сухость верхнего слоя почвы в сфагновых сосняках и усиливает дефицит влаги для деревьев (Кухта, 2009; Кухта, Попова, 2020;

³⁾ Асинхронность рассчитывалась как процент несовпадающих направлений от года к году по отношению ко всем направлениям.

Chernogaeva, Kuhta, 2018). Индикатором этого процесса является усиление дефолиации крон. Обнаруженная закономерность визуализирована на рис. 5б.



Рисунок 5а. Максимальные значения депигментации (max DP) ели и сумма осадков текущего вегетационного сезона

Figure 5a. Max pine depigmentation (max DP) and the precipitation amount of the current growing season



Рисунок 5б. Дефолиация (DF) ели и суммы осадков текущего вегетационного сезона

Figure 5b. Pine defoliation (DF) and the precipitation amount of the current growing season

Возможная связь степени дефолиация ели и уровня вод р. Межа предыдущего вегетационного сезона характеризуется положительными значениями коэффициента корреляции. Это означает, что при повышении уровня воды в реке (и, следовательно, почвенно-грунтовых вод) состояние древостоя на пробной площади 1 улучшается, о чём свидетельствует снижение степени депигментации крон. Ель в условиях ЦЛГЗ произрастает в условиях лучшей дренированности, чем сосна, и, будучи влаголюбивой породой, может испытывать недостаток влаги. Таким образом, в экотопе на пробной площади 1 поступление в корнеобитаемый слой воды улучшает состояние древостоя, сигналом чего является снижение степени депигментации. Ука-

занная закономерность представлена на рис. 5в и обнаруживает синхронность⁴⁾ динамики 60 %.



Рисунок 5в. Дефолиация (DF) ели и средний уровень вод р. Межа в предыдущем вегетационном сезоне

Figure 5в. Pine defoliation (DF) and the average water level of the Mezha river in the previous growing season

Для проверки гипотезы значимости выпадений атмосферных осадков предыдущего вегетационного сезона для уровня вод гидрографической сети ЦЛГЗ (и, в частности, болота Старосельский мох) и, следовательно, для параметров состояния крон сосняков и ельников был проведён корреляционный анализ рядов средних уровней вод р. Межа и болота Старосельский мох, а также сумм осадков как текущего, так и предшествующего вегетационных сезонов. Для сосны графики синхронности изменений дефолиации и депигментации с выявленными значимыми параметрами представлены на рис. 6 а, б и отчетливо не обнаруживают периодов сходной или, наоборот, противоположной, динамики. Отрицательные значения коэффициентов корреляции, близкие к значимым, обнаруживаются с суммами осадков текущего и предшествующего вегетационного периода (табл. 1, 2). Однако, помимо этого, дополнительно для сосны обнаружена отрицательная связь сумм осадков текущего и предшествующего периодов с *максимальными* годовыми показателями дефолиации с помощью расчета частных коэффициентов корреляции: для текущего периода $r = -0.50$ – статистически значим, для предшествующего периода $r = -0.48$ – близок к статистически значимому (не представлены в табл. 1, 2). Представленный на рис. 6в график динамики максимальных показателей дефолиации сосны с суммами осадков обнаруживает асинхронность в 61%.

⁴⁾ Синхронность рассчитывалась как процент совпадающих направлений от года к году по отношению ко всем направлениям.



Рисунок 6а. Депигментация (DP) сосны и сумма осадков в текущем вегетационном сезоне
Picture 6a. Pine depigmentation (DP) and the precipitation amount in the current growing season



Рисунок 6б. Дефолиация сосны (DF) и средний уровень вод болота Старосельский мох в текущем вегетационном сезоне
Figure 6b. Pine defoliation (DF) and the average water level of the Staroselsky moss swamp in the current growing season



Рисунок 6в. Связь максимальной дефолиации сосны (DF) и сумм осадков в текущем вегетационном сезоне

Figure 6v. The connection of max pine defoliation (DF) and the precipitation amount in the current growing season

Водный режим верхового болота во многом определяется аккумуляцией атмосферной влаги в течение предыдущих лет. В данном случае поступление атмосферной влаги увеличивает температуру и pH, насыщает кислородом почвенно-грунтовой раствор олиготрофного местообитания, что повышает качество почек возобновления и, следовательно, ассимиляционного аппарата в следующем году. В ранее опубликованных исследованиях подчеркивается определяющая роль доступности ресурсов предыдущего вегетационного сезона для успешного развития фотосинтезирующей части деревьев в текущем году (Максимова, Кухта, 2022; Кузнецова, Чернокульский, Кухта, 2020; Jansons et al, 2013). Биоиндикатором данного процесса является регистрируемое снижение депигментации крон сосны.

Интересно отметить, что дополнительно выявлена статистически значимая положительная связь между дефолиацией и депигментацией для ели ($r = 0.65$), и для сосны ($r = 0.52$). Это дает основание полагать, что дефицит определенного ресурса дает кумулятивный отклик на состояние крон древостоя. Полученные результаты оценки связей показателей состояния крон деревьев и метеорологических параметров и уровней вод позволяют предположить наличие значимых зависимостей и согласуются с опубликованными ранее итогами исследований, выполненными для иных параметров состояния хвойных пород. Так, проведенный ранее анализ древостоев ели европейской выявил прямые связи возрастной структуры и динамики её популяций от доступности ресурса влаги в местообитаниях (Дыренков, 1984; Коротков, 2023; Стороженко и др., 2018; Стороженко, 2022). Вместе с тем, отмечается бо́льшая, чем у сосны, чувствительность *P. abies* к водному стрессу, т.е. бо́льшая стенобионтность вида (Вомперский и др., 1975). Отмеченные в настоящей работе вероятные связи состояния крон *P. abies* и сумм осадков и средних значений уровней вод объясняется тем, что ель в условиях ЦЛГЗ произрас-

тает в свежих биотопах, в условиях, близких к экологическому оптимуму вида, в том числе и по признаку обводненности среды.

Также ряд научных работ посвящен определению откликов хода роста сосны на воздействие абиотических факторов. В них отмечены положительные корреляции приростов междоузлий сосны влажных биотопов и количеством осадков как предыдущего, так и текущего вегетационных сезонов (при отсутствии значимых корреляций с температурами) (Максимова, Кухта, 2022; Кухта, Попова, 2020; Кузнецова, Чернокульский, Кухта, 2020). Как и в рассматриваемом случае, объясняется это явлением физиологической сухости в сфагновых сосняках и на верховых болотах. В таких условиях атмосферные осадки повышают температуру субстрата и значение pH почвенного раствора, приносят в среду обитания кислород, снижая, тем самым, дефицит ресурсов, требуемых для роста дерева в высоту (Максимова, Кухта, 2022; Кухта, Попова, 2020).

Для верификации предполагаемых связей уровней вод и сумм осадков с показателями состояния крон сосны и ели требуется более длительный период наблюдений. В дальнейшем, в связи с тем, что оценка состояния крон хвойных пород проводится экспертным методом, наиболее репрезентативными характеристиками для анализа взаимосвязей с метеопараметрами вероятнее всего являются максимальные значения дефолиации и депигментации. Кроме того, предполагается осуществить более точные оценки корреляций рядов измерений на более длительном периоде наблюдений.

Заключение

В рамках выполнения Международной совместной программы комплексного мониторинга (МСП КМ) в Центральном-Лесном государственном природном биосферном заповеднике не обнаружено значимых корреляций состояния крон древостоев сосны обыкновенной и ели европейской со средними температурами. Полученный результат подтверждает, что древостои хвойных пород центральной части ЕТР не испытывают недостатки тепла в течение периода вегетации.

Выявлены отрицательные корреляции показателей состояния крон сосны обыкновенной и количества осадков текущего и предыдущего вегетационных сезонов, свидетельствующие о снижении дефолиации и депигментации с повышением уровня вод болота Старосельский мох. Указанное явление объясняется тем, что сосна обыкновенная на территории ЦЛГЗ произрастает на краю своей экологической ниши, и количество осадков являются лимитирующим фактором для данной породы в сфагновых биотопах.

Для ели европейской статистически значимые отрицательные связи и высокую асинхронность с суммарными осадками текущего года обнаружены с *максимальными* показателями депигментации и дефолиации. Тем не менее, данные результаты позволяют сделать заключение, что качество фотосинтезирующей части деревьев ели находится во взаимосвязи с количеством осадков и уровнем вод р. Межа предшествующего вегетационного сезона.

Таким образом, для корректной оценки состояния лесных экосистем необходимо учитывать параметры исследуемых местообитаний, а также выявлять лимитирующие развитие деревьев факторы. Полученные закономерности позволят оптимизировать комплекс методов биоиндикации, применяемых при оценке воздействия антропогенного загрязнения на природные экосистемы. Кроме того, понимание связей состояния лесных биоценозов и климатических, а также гидрологических, факторов даст возможность предсказывать вероятный отклик состояний биогеоценозов региона в соответствии с вероятными сценариями изменения климата, разработанными специалистами Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Список литературы

- Алисов, Б.П. (1956) *Климат СССР*, М., Изд-во Моск. ун-та. 128 с.
- База данных «Ценофонд Европейской России». URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/princip.htm> (дата обращения 02.10.2023).
- Большев, Л.Н., Смирнов Н.В. (1983) *Таблицы математической статистики*. Издание третье, М., Наука, Главная редакция физико-математической литературы. 416 с.
- Булыгина, О.Н., Разуваев, В.Н., Александрова, Т.М. (2014) Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR), *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942*.
- Вомперский, С.Э., Сабо Е.Д., Фомина, А.С. (1975) *Лесоосушительная мелиорация*, М., Наука, 295 с.
- Дыренков, С.А. (1984) *Структура и динамика таежных ельников*, Наука, Ленинградское отделение, 176 с.,
- Коротков, С.А. (2023) *Смена состава древостоев и устойчивость защитных лесов центральной части Русской равнины*, М., АНО «ДОБЛЕСТЬ ЭПОХ», 168 с.
- Кузнецова, В.В., Чернокульский, А.В., Козлов, Ф.А., Кухта, А.Е. (2020) Связь линейного и радиального прироста сосны обыкновенной с осадками разного генезиса в лесах Керженского заповедника, *Известия РАН. Серия географ.*, № 1, с. 93-102, doi: 10.31857/S2587556620010124.
- Кухта, А.Е. (2009) Влияние температуры и осадков на годичный линейный прирост сосны обыкновенной на берегах Кандалакшского залива, *Лесной вестник, МГУЛ*, № 1 (64), с. 61-67.
- Кухта, А.Е., Попова, Е.Н. (2020) Климатический сигнал в линейном приросте сосны обыкновенной бореальных фитоценозов побережья Белого моря, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. 31, № 3-4, с. 33-45, doi: 10.21513/0207-2564-2020-3-33-45.
- Кухта, А.Е., Пчелкин, А.В., Полещук, 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. 29, № 4, с. 29-37, doi: 10.21513/0207-2564-2018-4-29-43.

Летопись природы Центрально-Лесного заповедника. URL: [http:// clgz.ru/node/19216](http://clgz.ru/node/19216) (дата обращения 11.12.2023).

Максимова, О.В., Кухта, А.Е. (2022) Вариабельность линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной побережья Белого моря в зависимости от условий произрастания, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIII, № 3-4, с. 20-36, doi: 10.21513/0207-2564-2022-3-4-20-36.

Руководство по комплексному мониторингу (2013) Перевод с английского, М., ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН».

Стороженко, В.Г., Быков, А.В., Петров, А.В., Бухарева, О.А. (2018) *Устойчивость лесов. Теория и практика биогеоценотических исследований*, М., Товарищество научных изданий КМК, 173 с.

Стороженко, В.Г. (2022) Сравнительная оценка сукцессионной динамики древесных фракций ельников южной тайги, *Вопросы лесной науки*, № 3. URL: [http:// jfsi.ru/3-2022/](http://jfsi.ru/3-2022/). (дата обращения 11.12.2023).

Сукачёв, В.Н. (1972) *Избранные труды в трех томах: Основы лесной типологии и биогеоценологии*, под ред. Е. М. Лавренко, Л., Наука, т. 1, 419 с.

Chernogaeva, G.M., Kuhta, A.E. (2018) The Response of Boreal Forest Stands to Recent Climate Change in the North of the European Part of Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 43, no. 6, pp. 418-424, doi:10.3103/S1068373918060109.

Chernogaeva, G.M., Kuznetsova, V.V., Kukhta, A.E. (2020) Precipitation Effects on the Growth of Boreal Forest Stands in the Volga Region, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 45, no. 12, pp. 851-857. doi: 10.3103/S1068373920120055.

Gavrikov, V.L., Karlin, I.V. (1993) A dynamic model of tree terminal growth, *Can. J. For. res.*, vol. 23, pp. 326-329.

Jansons, A., Matisons, R., Baumanis, I., Puriņa, L. (2013) Effect of climatic factors on height increment of Scots pine in experimental plantation in Kalsnava, Latvia, *Forest Ecology and Management*, 306, pp. 185-191, doi: 10.1016/j.foreco.2013.06.039.

References

Alisov, B.P. (1956) *Klimat SSSR* [Climate of the USSR], Moscow, Russia, 128 p.

Baza dannyh «Cenofond Evropejskoj Rossii» [The database "Cenofond of European Russia"] URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora / princip.htm> (accessed 02.10.2023).

Bulygina, O.N., Razuvaev, V.N., Alexandrova, T.M. *Opisaniye massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR)* [Description of the data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations]

in Russia and the former USSR (TTTR)], *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2014620942*.

Vompersky, S.E., Sabo, E.D., Fomina, A.S. (1975) *Lesosushitel'naya melioratsiya* [Forest drainage reclamation], Nauka, Moscow, Russia, 295 p.

Dyrenkov, S.A. (1984) *Struktura i dinamika tayezhnykh yel'nikov* [Structure and dynamics of taiga spruce forests], Nauka, Leningradskoye otделение, Moscow, Russia, 176 p.

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

Kuznecova, V.V., Chernokul'skij, A.V., Kozlov, F.A., Kuhta, A.E. (2020) The relationship of linear and radial growth of scots pine with precipitation of different genesis in the forests of the Kerzhensky Reserve, *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, no. 1, pp. 93-102.

Kuhta, A.E. (2009) The influence of temperature and precipitation on the annual linear growth of scots pine on the shores of the Kandalaksha Bay, *Lesnoj vestnik, MGUL*, no. 1 (64), pp. 61-67.

Kuhta, A.E., Popova, E.N. (2020) Climate signal in linear growth of scots pine of boreal phytocenoses of the White Sea coast, *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. 31, no. 3-4, pp. 33-45, doi:10.21513/0207-2564-2020-3-33-45.

Kukhta, A.E., Pchelkin, A.V., Poleshchuk, A.M. (2018) 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 Cooperative Program for Integrated Monitoring, *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. 29, no. 4, pp. 29-37. doi: 10.21513/0207-2564-2018-4-29-43.

Letopis' prirody Tsentral'no-Lesnogo zapovednika. [Chronicle of the nature of the Central Forest Reserve]. URL: <https://clgz.ru/node/19216> (accessed 11.08.2023).

Maksimova, O.V., Kuhta, A.E. (2022) Variability of linear and radial increments of Scots pine of the White Sea coast depending on growing conditions, *Ekologicheskij monitoring i modelirovaniye ekosistem*, vol. XXXIII, no. 3-4, pp. 20-36, doi: 10.21513/0207-2564-2022-3-4-20-36.

Rukovodstvo po kompleksnomu monitoring (2013). Perevod s angliyskogo, Federal State Budgetary Institution "IGKE Roshydromet and RAS", Moscow, Russia,

Storozhenko, V.G., Bykov, A.V., Petrov, A.V., Bukhareva, O.A. (2018) *Ustoychivost' lesov. Teoriya i praktika biogeotsenoticheskikh issledovaniy* [Forest sustainability. Theory and practice of biogeocenotic research], Partnership of scientific publications KMK, Moscow, Russia, 173 p.

Storozhenko, V.G. (2022) Comparative assessment of the successional dynamics of tree fractions of spruce forests of the southern taiga, *Voprosy lesnoj nauki* no. 3. URL: <http://jfsi.ru/3-2022> (accessed 11.12.2023).

Sukachyov, V.N. (1972) *Izbrannye trudy v trekh tomah. Osnovy lesnoj tipologii i biogeocenologii, pod red. E. M. Lavrenko* [Selected works in three volumes: Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology, ed. E. M. Lavrenko], Leningrad, Russia, vol. 1, 419 p.

Chernogaeva, G.M., Kuhta, A.E. (2018) The Response of Boreal Forest Stands to Recent Climate Change in the North of the European Part of Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, Allerton Press Inc. (United States), vol. 43, no. 6, pp. 418-424, doi:10.3103/S1068373918060109.

Chernogaeva, G.M., Kuznetsova, V.V., Kukhta, A.E. (2020) Precipitation Effects on the Growth of Boreal Forest Stands in the Volga Region, *Russian Meteorology and Hydrology*, Allerton Press Inc. (United States), vol. 45, no. 12, pp. 851-857. doi: 10.3103/S1068373920120055.

Gavrikov, V.L., Karlin, I.V. (1993) A dynamic model of tree terminal growth, *Can. J. For. Res.*, vol. 23, pp. 326-329.

Jansons, A., Matisons, R., Baumanis, I., Puriņa, L. (2013). Effect of climatic factors on height increment of Scots pine in experimental plantation in Kalsnava, Latvia, *Forest Ecology and Management*, 306, 185-191. doi: 10.1016/j.foreco.2013.06.039.

Статья поступила в редакцию (Received):

Статья доработана после рецензирования (Revised):

Для цитирования / For citation

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.

Sherstneva E.A., Maksimova O.V., Koukhtha A.E., Tikhonova I.O. (2024) The impact of climatic factors on the state of model stands of the Central Forest state natural biosphere reserve, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXV, № 3-4, pp. 38-55, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-38-55.

Анализ состояния отрасли по обращению с отходами производства и потребления в контексте климатической повестки

Д.В. Шушпанова^{1)}, А.М. Якушина¹⁾, И.О. Тихонова²⁾, О.В. Голуб¹⁾*

¹⁾ ФГАУ «НИИ «Центр экологической промышленной политики»,
Российская Федерация, 141006, Московская обл., г. Мытищи, Олимпийский проспект, д. 42

²⁾ ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Российская Федерация, 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9

*Адрес для переписки: d.shushpanova@eipc.center

Реферат. В рамках снижения негативного воздействия на климат и окружающую среду Российская Федерация ведет работу над сокращением количества неутилизованных отходов производства и потребления путем вовлечения их в хозяйственный оборот в виде вторичных материальных и энергетических ресурсов. В 2018 г. утверждена «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года» (далее – Стратегия), реализация которой позволит стабилизировать выбросы парниковых газов при снижении полигонного захоронения, увеличения объемов сортировки и переработки, получения вторичных ресурсов и производства вторичного сырья для экономики замкнутого цикла. В статье проанализировано формирование отрасли по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления (далее – отходов) в период 2019-2023 гг., с помощью информационного мониторинга оценена динамика реализации Стратегии в 2019-2023 годах и достижение целевых показателей. Представлены данные по выбросам метана и углекислого газа как основных парниковых газов, выделяемых в процессе обращения с отходами, результаты мониторинга Стратегии с учетом вовлечения в экономику замкнутого цикла отраслей промышленной и коммунальной сферы и применения мер стимулирования на всех уровнях, вплоть до государственного. В заключении даны предложения по актуализации Стратегии, включающие, в том числе, мониторинг выбросов парниковых газов при обращении с отходами.

Ключевые слова. Изменение климата, парниковые газы, отходы производства и потребления, вторичные ресурсы, вторичное сырье, экономика замкнутого цикла.

Industrial and household waste management industry status analysis in the context of climate agenda

*D.V. Shushpanova¹⁾ *, A.M. Yakushina¹⁾, I.O. Tikhonova²⁾, O.V. Golub¹⁾*

¹⁾ Federal State Autonomous Institution "Research Institute "Environmental Industrial Policy Center",
42, Olympic Avenue, 141006, Moscow Region, Mytishchi, Russian Federation

²⁾ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education D.I. Mendeleyev
University of Chemical Technology of Russia,
9, Miusskaya Square, 125047, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *d.shushpanova@eipc.center*

Abstract. In order to reduce the negative impact on the climate and the environment, the Russian Federation is working to cut the amount of non-recycled industrial and municipal waste by recycling it as material and energy resources. In 2018, the "Strategy for the Development of the Industry for the Processing, Recycling and Neutralization of Industrial and Municipal Waste for the Period up to 2030" (hereinafter referred to as the Strategy) was approved, the implementation of which will stabilize greenhouse gas emissions while reducing landfills, increasing the volume of sorting and processing, re-obtaining resources and producing recycled raw materials for a circular economy. The article analyzes the formation of the industry for the processing, recycling and neutralization of industrial and municipal waste (hereinafter referred to as waste) in the period 2019-2023, using information monitoring, the dynamics of the Strategy implementation in 2019-2023 and the achievement of target indicators were assessed. Here are the methane and carbon dioxide emissions as the main greenhouse gases emitted during waste management, the results of monitoring the Strategy taking into account the involvement of industrial and municipal sectors in the circular economy and the stimulative promotion at all levels, including the governmental. The conclusion provides proposals for updating the Strategy, with monitoring greenhouse gas emissions during waste management among other.

Keywords. Climate change, greenhouse gases, industrial and municipal waste, secondary resources, secondary raw materials, circular economy.

Введение

В настоящее время человечество сталкивается с кризисом, который определяется мировым сообществом как тройной, и сочетает в себе взаимосвязанные проблемы: изменения климата, деградации природных экосистем и утраты биоразнообразия¹⁾. Для преодоления последствий тройного

¹⁾ What is the Triple Planetary Crisis? United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/news/what-is-the-triple-planetary-crisis>

кризиса разработаны Зеленые проекты²⁾ (Макаров и др., 2020), применяемые в настоящее время в политике устойчивого развития (Houssam et al., 2023) с целью сокращения антропогенных выбросов парниковых газов (далее – ПГ).

Российская Федерация ратифицировала климатические конвенции и международные соглашения^{3),4),5),6)}, выполняет соответствующие обязательства, а также ведет кадастр действий по достижению показателей уровня выбросов ПГ. Дополнительно ведется кадастр отходов производства и потребления, включающий в себя выбросы ПГ от захоронения твердых коммунальных отходов (далее – ТКО) на свалках и полигонах и сжигания на мусоросжигательных заводах.

Несмотря на то, что углекислый газ (CO₂) по объемам выбросов является самым распространенным ПГ, потенциал глобального потепления метана (CH₄) в 25 раз больше, чем CO₂. Антропогенные выбросы CH₄ приходятся, в основном, на добычу углеводородов, очистку сточных вод и размещение отходов. По данным Росстата, в 2021 г. количество выбросов ПГ при обращении с отходами, составило 96.7 млн т CO₂-экв /г (рис. 1). Эквивалентная доля выбросов метана составила 14.6%.

Снижения уровня выбросов ПГ планируется достичь как за счет уменьшения количества образующихся отходов, так и за счет их рациональной сортировки и переработки во вторичные ресурсы для производства вторичного сырья, в том числе в рамках мер по снижению негативного воздействия на окружающую среду^{7),8)}. Такой подход позволяет уже к 2030 году сформировать экономику замкнутого цикла (далее – ЭЗЦ) и развить отрасль промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства

²⁾ On the way to 2030. UNESCO reports on science. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000235406>

³⁾ Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (Принята 09.05.1992) https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml

⁴⁾ Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (Принят 11.12.1997) https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml

⁵⁾ Парижское соглашение Организации Объединенных Наций (Принято 12.12.2015) <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement>

⁶⁾ Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации»

⁷⁾ Паспорт отраслевой программы «Применение вторичного сырья из отходов в промышленном производстве», утвержден Заместителем Председателя Правительства Российской Федерации В.В. Абрамченко от 17.11.2022 № 13493п-П11

⁸⁾ Паспорт отраслевой программы «Применение альтернативного топлива их отходов в промышленном производстве на 2022-2030 годы», утвержден Заместителем Председателя Правительства Российской Федерации В.В. Абрамченко от 28.12.2022 № 16042п-П11

и потребления (далее – ППО)⁹⁾ для достижения экологического благополучия¹⁰⁾ государства и его населения.



Рисунок 1. Выбросы парниковых газов, связанные с обращением отходами, в период с 2005 по 2021 гг., млн т CO₂-экв./г (составлено авторами по данным Росстата)

Figure 1. Waste management greenhouse gas emissions from 2005 to 2021, million tons of CO₂-eq./year (compiled by the authors based on Rosstat data)

В технологически развитых странах мира переработка отходов превратилась в самостоятельную отрасль экономики, что объясняется не только ростом потребления и удорожанием первичного сырья, но и потребностью в снижении антропогенного воздействия на окружающую среду, осознании негативных климатических эффектов ПГ.

Целью обзора является оценка эффективности развития отрасли ППО, как фактора сохранения климата и снижения уровня выбросов метана. Отслежена хронология формирования промышленной инфраструктуры, проанализирована динамика процесса в 2019-2023 годах, адекватность обозначенных в Стратегии целевых показателей, сформулированы перспективные предложения.

Формирование отрасли промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов.

Использование вторичных ресурсов.

Экономика замкнутого цикла и промышленный симбиоз

Отрасль ППО – это совокупность хозяйствующих субъектов, осуществляющих вовлечение отходов в экономический оборот. Развитие отрасли ППО основано на принципах ресурсосбережения и сопровождается внедре-

⁹⁾ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25.01.2018 № 84-р «Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года»

¹⁰⁾ Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»

нием инновационных технологий сортировки, переработки и обезвреживания отходов, использованием экологически безопасного промышленного оборудования (Гаев и др., 2021).

ЭЗЦ – это отражение принципов существования естественных систем, в которых образующиеся отходы становятся ресурсом для другого процесса (Аксенова, Максимов, 2021). Концепция ЭЗЦ включает, помимо переработки отходов, повторное использование вторичных ресурсов, ремонт и восстановление готовой продукции с сохранением ее ценности для возврата в биосферу в качестве безопасного объекта по окончании жизненного цикла (рис. 2).



Рисунок 2. Принципы экономики замкнутого цикла (Толстых и др., 2024б)

Figure 2. Principles of the circular economy (Tolstykh et al., 2024)

Одним из подходов к реализации ЭЗЦ является промышленный симбиоз (Толстых и др., 2024а), вносящий весомый вклад в развитие и сотрудничество компаний посредством организации взаимовыгодного экономически эффективного использования первичных и вторичных ресурсов (рис. 3), создания продуктов, безвредно усваиваемых в экосистемах, а также снижения объемов образования отходов и выделяемых парниковых газов (Петросян и др., 2021; Уткина, 2020).

Для внедрения ЭЗЦ необходима гармонизация промышленной (стимулирующей) и экологической (природоохранной) политики (Скобелев, 2020; Шубов и др., 2023).

Государственные меры поддержки промышленных симбиозов направлены на развитие проектов ППО в зонах, где наиболее ярко выражено антропогенное воздействие на окружающую среду и климат. Материальное и нематериальное стимулирование помогает преодолевать экономические барьеры и внедрять эко-инновации (Хачатуров и др., 2023), в том числе по контролю выбросов ПГ.



Рисунок 3. Обмен ресурсами при промышленном симбиозе (составлено авторами)

Figure 3. Resource exchange in industrial symbiosis (compiled by the authors)

Образование и накопление отходов производства и потребления. Схемы обращения с опасными и коммунальными отходами

Согласно данным Росприроднадзора¹¹⁾ свыше 58 млрд т отходов накоплено в результате прошлой хозяйственной деятельности, выявлено 340 объектов накопленного вреда окружающей среде. С ростом потребления увеличивается количество захоронений отходов, не вовлекающихся во вторичный хозяйственный оборот, что приводит к значительным выбросам парниковых газов, деградации ландшафта и сокращению потенциально продуктивных сельскохозяйственных угодий (Зиновьева, 2023). В 2014 году в стране зафиксировано образование 5.2 млрд т отходов, а в 2023 году – 9.3 млрд т, то есть за 10 лет показатель вырос в 1.8 раза (рис. 4). Что же касается выбросов ПГ, то подобной корреляции с отчетностью 2-ТП (Отходы) не наблюдается (рис. 5).

Добывающая промышленность – это наибольший источник (как правило, наименее опасных) промышленных отходов (рис. 6). В 2023 г. большая часть (93.4%) от общего количества образованных отходов приходилась на топливно-энергетический сектор (в основном на угольные предприятия) в связи с тем, что при добыче и обогащении полезных ископаемых образуется большое количество пустой породы и вскрышных грунтов. ТКО в 2023 г. образовано 47.2 млн т, что на 2.8% выше уровня 2022 г. (45.9 млн т).

¹¹⁾ Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления (Отчет по форме 2-ТП (отходы) <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/>



Рисунок 4. Динамика образования отходов в России в 2014-2023 гг.
(составлен авторами по данным 2-ТП (отходы))

Figure 4. Dynamics of waste generation in Russia in 2014-2023
(compiled by the authors based on 2-TP (waste) data)



Рисунок 5. Совокупные выбросы парниковых газов в России в период с 2005 по 2021 гг.
(составлен авторами по данным Росстата)

Figure 5. Total greenhouse gas emissions in Russia from 2005 to 2021
(compiled by the authors based on Rosstat data)

Основную долю от общего количества утилизируемых отходов составляют неопасные отходы, которые в 2023 г. составили 9.3 млрд т или 99.1% от всех образовавшихся в России отходов. Опасные отходы образуются в промышленности, их необходимо обезвреживать, но, в силу халатности или злонамеренности, они оказываются и на полигонах ТКО, что наносит значительный ущерб окружающей среде. В 2019 г. для увеличения доли переработки отходов и борьбы с несанкционированными свалками в стране была возложена ответственность за переработку опасных отходов на компанию

«Федеральный Экологический оператор»¹²⁾, а за переработку ТКО – на компанию «Российский экологический оператор» (далее – РЭО)¹³⁾ и на региональные власти¹⁴⁾, которые выбирают квалифицированных операторов (Белов, 2023).

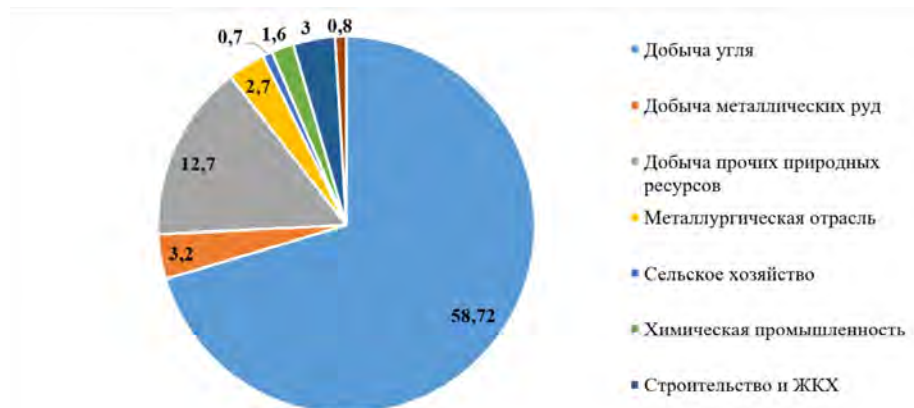


Рисунок 6. Доля отраслей промышленности в образовании отходов в 2023 г., %
(составлен авторами по 2-ТП (отходы))

Figure 6. Share in the industrial waste generation in 2023, %
(compiled by the authors based on 2-TP (waste) data)

Для выделения максимального количества вторичных ресурсов отходы должны подвергаться сортировке. РЭО разработала федеральную схему¹⁵⁾ (Задера, 2022), в которой содержится более 1200 объектов – мощностей по сортировке, компостированию, производству альтернативных видов топлива, а также современных полигонов ТКО. Систематизация обращения с ТКО (наиболее сложный и ценный вид отходов) позволит снизить их захоронение на 50% и экономически рационализировать их перемещение, которое вносит значимый вклад в отраслевые выбросы ПГ. В рамках реализации института расширенной ответственности производителей товаров и упаковки¹⁶⁾ составляется реестр утилизаторов отходов, которые считаются производителями вторичного сырья.

¹²⁾ Распоряжение Правительства РФ от 14.11.2019 № 2684-р «Об определении федерального оператора по обращению с отходами I и II классов опасности»

¹³⁾ Указ Президента РФ от 14.01.2019 № 8 «О создании публично-правовой компании по формированию комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами «Российский экологический оператор»

¹⁴⁾ Статья 24.6 Федерального закона от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»

¹⁵⁾ Постановление Правительства РФ от 25.12.2019 N 1814 (ред. от 28.11.2022) «О разработке, утверждении и корректировке федеральной схемы обращения с твердыми коммунальными отходами»

¹⁶⁾ Федеральный закон от 04.08.2023 № 451-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» и отдельные законодательные акты Российской Федерации»

Раздельный сбор и сортировка отходов производства и потребления

Разделение отходов – практика их сбора и сортировки с учётом происхождения и пригодности к переработке или вторичному использованию (Гаев и др., 2019). Это позволяет сократить расходы на вывоз отходов и их промышленное сепарирование, а также вернуть в экономический оборот максимум полезных материалов.

Извлечение из отходов органической составляющей снижает неорганизованные выбросы метана, а при переработке органических отходов получают биогаз как энергетический ресурс. Наиболее известными примерами разделения отходов являются рециклинг макулатуры, металлолома и стеклотары, применявшиеся на территории стран Европы и Азии, в том числе в СССР, еще в первой половине XX века (Цховребов, 2022). В России с 2000-х годов раздельным сбором занимались индивидуально при поддержке экологических организаций. Реформа 2019 г. предполагает повсеместное внедрение раздельного сбора отходов; уже введены в эксплуатацию опытные системы сортировки ТКО (рис. 7). Это первые попытки создать сферу рециклинга в стране.

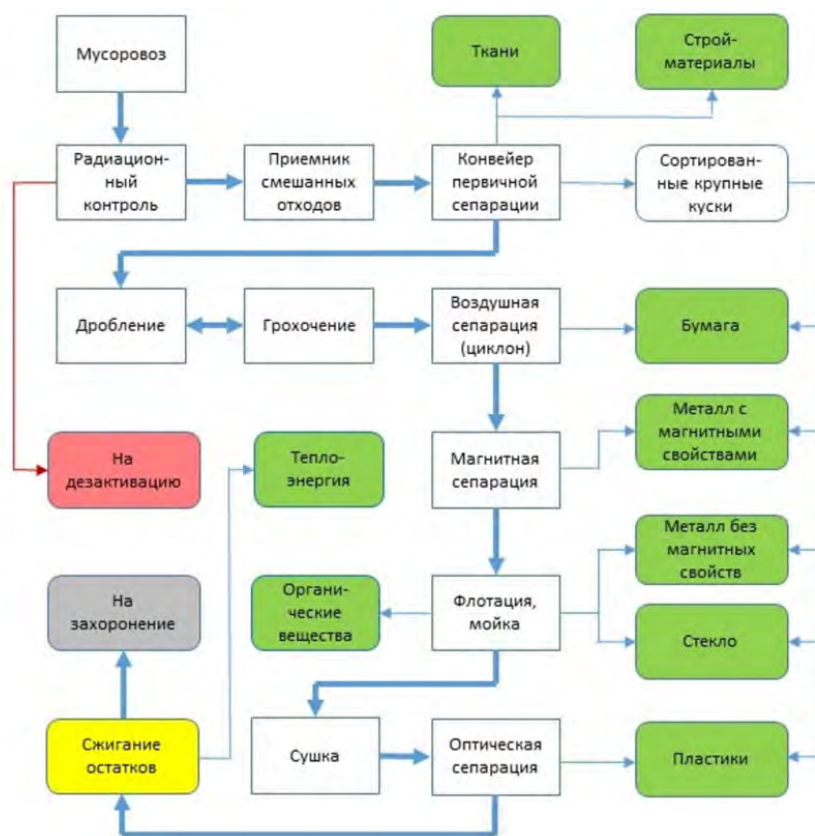


Рисунок 7. Пример разделения ТКО на сортировочном объекте (составлен авторами)

Figure 7. Example of separation of municipal solid waste (MSW) at a sorting facility (compiled by the authors)

Выделение органической составляющей из ТКО наряду с полноценной утилизацией сельскохозяйственных отходов и илов водоочистки представляет наибольший интерес с точки зрения сокращения выбросов ПГ при обращении с отходами. Сжигание отходов допустимо только при условии полезного использования тепла дымовых газов и использования воздухоочистки; при этом такой способ остается единственным экономически оправданным видом утилизации для большого спектра отходов, содержащих ископаемый углерод.

Мониторинг реализации Стратегии, оценка достижения целевых показателей

Отрасль ППО должна быть сформирована к 2030 году, и с момента утверждения Стратегии в 2018 г. проводится мониторинг ее реализации с целью анализа динамики развития инфраструктурных объектов.

Мониторинг реализации Стратегии включает проведение статистического наблюдения, регулярных исследований и подготовку ежегодного аналитического доклада о результатах развития (Смирнова, Голуб, 2024) и выражен в регулярном анализе территориальных схем обращения с отходами, докладов о состоянии окружающей среды, региональных программ в сфере обращения с отходами и иной административной информации. В табл. 1 представлены сводные данные по реализации некоторых целевых показателей реализации Стратегии за период с 2019 по 2023 гг. и планируемых результатов на 2025 и 2030 гг.

Таблица 1. Перечень реализуемых целевых показателей Стратегии в 2019-2023 гг. в соответствии с планируемыми показателями на 2025, 2030 гг. (составлена авторами)
Table 1. List of indicators of the Strategy in 2019-2023 in accordance with targets for 2025, 2030 (compiled by the authors)

№ п/п	Наименование целе- вого показателя, еди- ница измерения	Фактические значения					План	
		2019	2020	2021	2022	2023	2025	2030
1	Доля утилизирован- ных и обезврежен- ных отходов в общем объеме обра- зованных отходов, %	50.1	49.3	46.6	45.7	42.7	75	86
2	Доля твердых ком- мунальных отходов, направленных на обработку, в общем объеме отходов, вывезенных с мест накопления, %	30	38.6	46.5	48.8	49.9	50	80
3	Количество создан- ных экотехнопар- ков, ед.	3	3	7	7	10	30	70

№ п/п	Наименование целе- вого показателя, еди- ница измерения	Фактические значения					План	
		2019	2020	2021	2022	2023	2025	2030
4	Количество создан- ных производ- ственно-технических комплексов по обра- ботке, утилизации и обезвреживанию отходов, ед.	10	59	333	337	342	101	226
5	Количество создан- ных мусоросортиро- вочных комплексов твердых коммуналь- ных отходов, ед.	46	282	271	280	292	210	310
6	Количество создан- ных многофункци- ональных комплексов по промышленному обезвреживанию отходов, ед.	44	44	135	135	135	50	110
7	Количество создан- ных многофункци- ональных сортировочных ком- плексов, ед.	17	17	25	25	25	50	110
8	Уровень снижения образования отхо- дов, %	-6.7	+10.3	- 21.5	- 6.7	-2.9	- 1.8	- 3.7

В 2023 г. уже удалось достичь ряда показателей, запланированных к 2025 и 2030 гг., наблюдается рост количества экотехнопарков, мусоросортировочных и многофункциональных комплексов, а также организаций и предприятий, осуществляющих сбор, обработку и утилизацию отходов. В настоящее время общее количество предприятий и организаций отрасли составляет 11 910. Из них примерно 40% занимаются сбором и сортировкой отходов и 43% – их утилизацией, примерно 33% производят вторичное сырье; увеличивается количество предприятий, занимающихся утилизацией и обезвреживанием. После провала в годы пандемии стало расти количество средних и крупных предприятий (рис. 8), на которых происходит наиболее комплексная и экологически безопасная утилизация отходов. В отрасли присутствуют как предприятия со значительной долей устаревших фондов, так и принципиально новые, созданные в последние годы.

Рентабельность отрасли ППО неуклонно повышается, при этом как раз утилизация отходов, содержащих ископаемый углерод, выглядит как наименее экономически привлекательная (рис. 9). Деятельность по обработке стекла, бумаги и картона, полимеров и резины существует практически только за счет малого бизнеса, что указывает на нестабильность именно тех

секторов обращения с отходами, которые вносят наибольший вклад в выбросы ПГ.

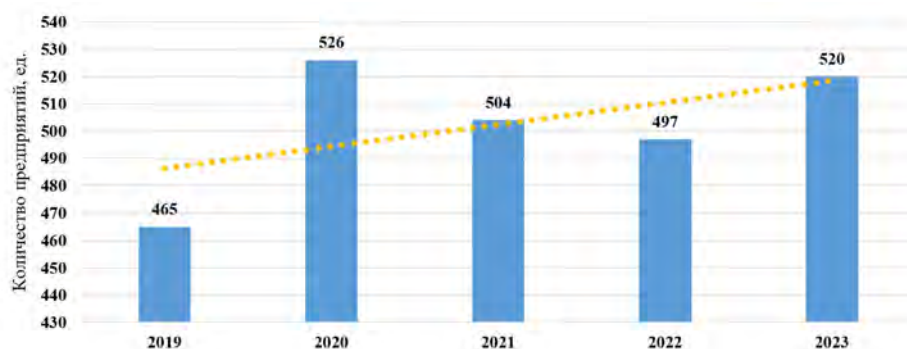


Рисунок 8. Динамика количества средних и крупных предприятий, занимающихся утилизацией и обезвреживанием отходов (составлен авторами по данным ЕГРЮЛ)

Figure 8. Dynamics in the number of medium and large enterprises engaged in waste disposal and neutralization (compiled by the authors based on Unified State Register of Legal Entities data)



Рисунок 9. Уровень рентабельности продукции, работ, услуг в 2022 г. (составлен авторами)

Figure 9. Profitability of products, works, services in 2022 (compiled by the authors)

Заключение

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что необходимо осуществлять корректировку целевых показателей «Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года», выявлять причины, в силу которых некоторые целевые показатели не были достигнуты, а также разрабатывать предложения по совершенствованию нормативных правовых актов.

Предлагаемые поправки в Стратегию учитывают сложившиеся изменения в сфере обращения с отходами и основываются на рисках возникновения

неблагоприятных последствий для отрасли в условиях нестабильной санитарно-эпидемиологической ситуации в мире, затяжном восстановлении мировой экономики и структурном замедлении темпов ее роста в среднесрочной перспективе, а также воздействию отрасли ППО на окружающую среду в целом и на климат в частности.

Поправки в Стратегию позволят более качественно и полноценно обеспечить исполнение целевых показателей, установленных Национальными целями развития Российской Федерации на период до 2030 г.¹⁷⁾

При актуализации Стратегии считаем целесообразным включить целевой показатель, отражающий оценку выбросов ПГ в отрасли ППО и предложить механизм его учета и контроля.

Кроме изменения целевых показателей предлагается выделить в отдельную товарную группу как ценные материалы, образующиеся при сортировке отходов, так и полуфабрикаты, получаемые при их переработке, а также вторичное сырье. Это позволит предприятию вести обращение с такими продуктами как с товаром, а не как с отходом, что облегчает документооборот и позволяет достовернее рассчитать их углеродоемкость.

В случае принятия решения о внедрении экономических преференций для предприятий, использующих вторичное сырье в производстве, необходимо учитывать ценность используемых технологий с точки зрения минимизации образования ПГ.

Также предлагается ввести учет выбросов ПГ, в том числе метана, в экотехнопарках, на отходоперерабатывающих предприятиях и полигонах, использующих активную систему дегазации.

Для формирования современного облика отрасли необходима долгосрочная политика создания и развития стимулов по вовлечению отходов в экономический оборот, формированию рынка вторичного сырья и улучшения состояния окружающей среды, в том числе через контроль выбросов ПГ.

Список литературы

Аксенова, Е.М., Максимов, И.И. (2021) *Экономика замкнутого цикла. Обзор международных подходов*, Проектно-аналитический отдел, Департамент многостороннего экономического сотрудничества и специальных проектов Минэкономразвития России.

Белов, В. (2023) *Особенности формирования и реализации региональной политики энергосбережения* (Features of formation and implementation of regional energy saving policy), SSRN 4613751, URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4613751> (дата обращения: 03.09.2024).

¹⁷⁾ Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года»

Гаев, Ф.Ф., Смирнова, Т.С., Голуб, О.В., Марьев, В.А. (2021) Реализация стратегии развития отходоперерабатывающей отрасли в России, *Экономика устойчивого развития*, № 2 (46), с. 42-46.

Гаев, Ф.Ф., Якушина, А.М., Цховребов, Э.С., Величко, Е.Г., Рахманов, М.Л., Шканов, С.И. (2019) Экономические и организационные аспекты раздельного сбора твердых коммунальных и крупногабаритных отходов, *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*, № 1, с. 96-108.

Задера, С. (2022) Минприроды утвердило федеральную схему обращения с ТКО, *Российская газета*, URL: <https://rg.ru/2022/12/29/minprirody-utverdilo-federalnuiu-shemu-obrashcheniia-s-tko.html> (дата обращения: 03.09.2024).

Зиновьева, О.А. (2023) Реализация Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, *Вестник Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА)*, № 3 (103), с. 139-147.

Киреева, А.В., Золотарева, А.Б. (2023) Совершенствование расширенной ответственности производителей в контексте «мусорной» реформы, *Трансформация национальной социально-экономической системы России*, с. 92-97.

Макаров, И.Н., Дробот, Е.В., Левчegov, О.Н. (2020) Зеленая экономика, цифровые технологии и наноинструментарий: основные базисы трансформации производственных систем в Евразийском экономическом союзе, *Экономические отношения*, т. 10, № 3, с. 719-742.

Петросян, В.С., Тихонова, И.О., Епифанцев, А.С., Щелчков, К.А., Цветкова, Е.А. (2021) Опыт создания промышленного симбиоза предприятий химической промышленности, *Экология и промышленность России*, т. 25, № 8, с. 28-33.

Скобелев, Д.О. (2020) Промышленная политика повышения ресурсоэффективности и достижение целей устойчивого развития, *Journal of New Economy*, т. 21, № 4, с. 153-173.

Смирнова, Т.С., Голуб, О.В. (2024) Мониторинг реализации отраслевой программы «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве», *Экономика устойчивого развития*, № 2 (58), с. 232-237.

Толстых, Т.О., Гераськина, А.А., Щелчков, К.А. (2024а) Перспективы экономики замкнутого цикла в России на этапе глобальных вызовов, *Экономика устойчивого развития*, № 2(58), с. 252-257.

Толстых, Т.О., Гераськина, А.А., Щелчков, К.А. (2024б) Подходы к формированию критериев оценки эффективности промышленных симбиозов, *Регион: системы, экономика, управление*, № 2 (65), с. 113-125.

Уткина, Е.Э. (2020) Анализ и классификация способов оценки промышленно-симбиотических взаимодействий, *Вестник Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова*, т. 17, № 5 (113), с. 26-41.

Хачатуров, А.Е., Гусева, Т.В., Молчанова, Я.П. (2023) Менеджмент инноваций как инструмент обеспечения устойчивого развития, *Менеджмент в России и за рубежом*, № 4, с. 39-47.

Цховребов, Э.С. (2022) Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*, № 4 (40), с. 116-135.

Шубов, Л.Я. Доронкина, И.Г., Смирнова, Т.С., Голуб, О.В. (2023) Промышленная политика модернизации ресурсоемких отраслей, *Экологические системы и приборы*, № 2, с. 29-35.

Houssam, N., Ibrahiem, D., Sucharita, S., El-Aasar, K., Easily, R., Sethi, N. (2023) Assessing the Role of Green Economy on Sustainable Development in Developing Countries, *Heliyon*, vol. 9(6), e17306, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17306.

References

Aksenova, E.M., Maksimov, I.I. (2021) *Ekonomika zamknutogo tsikla. Obzor mezhdunarodnykh podkhodov* [Circular economy. Review of international approach], Project and analytical department, Proyektno-analiticheskiy otdel, Departament mnogostoronnego ekonomicheskogo sotrudnichestva i spetsial'nykh proyektov Minekonomrazvitiya Rossii [Department of multilateral economic cooperation and special projects of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation].

Belov, V. (2023) *Osobennosti formirovaniya i realizatsii regional'noy politiki energosberezheniya* [Features of formation and implementation of regional energy saving policy], SSRN 4613751, URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4613751> (accessed: 03.09.2024).

Gaev, F.F., Smirnova, T.S., Golub, O.V., Maryev, V.A. (2021) [Realizatsiya strategii razvitiya otkhodopererabatyvayushchey otrasli v Rossii] Implementation of the waste processing industry development strategy in Russia, *Ekonomika ustoychivogo razvitiya*, no. 2 (46), pp. 42-46.

Gaev, F.F., Yakushina, A.M., Tskhovrebov, E.S., Velichko, E.G., Rakhmanov, M.L., Shkanov, S.I. (2019) *Ekonomicheskiye i organizatsionnyye aspekty razdel'nogo sbora tverdykh kommunal'nykh i krupnogabaritnykh otkhodov* [Economic and organizational aspects of separate collection of municipal solid and bulky waste], *Zhilishchnoye khozyaystvo i kommunal'naya infrastruktura*, no. 1, pp. 96-108.

Zadera, S. (2022) *Minprirody utverdilo federal'nyuyu skhemu obrashcheniya s TKO* [The Ministry of Natural Resources approved the federal scheme for handling

MSW], *Rossiyskaya Gazeta*, URL: <https://rg.ru/2022/12/29/minprirody-utverdilo-federalnuiu-shemu-obrashcheniia-s-tko.html> (accessed: 03.09.2024).

Zinovieva, O.A. (2023) Realizatsiya Strategii razvitiya promyshlennosti po obrabotke, utilizatsii i obezvrezhivaniyu otkhodov proizvodstva i potrebleniya na period do 2030 goda [Implementation of the Strategy for the development of industry for the processing, recycling and disposal of production and consumption waste for the period up to 2030], *Vestnik Universiteta imeni O.Ye. Kutafina (MGYU)* [Courier of Kutafin Moscow State Law University (MSAL)], no. 3 (103), pp. 139-147.

Kireeva, A.V., Zolotareva, A.B. (2023) Sovershenstvovaniye rasshirennoy otvetstvennosti proizvoditeley v kontekste «musornoy» reformy [Improvement of extended producer responsibility in the context of the "garbage" reform], *Transformatsiya natsional'noy sotsial'no-ekonomicheskoy sistemy Rossii* [Transformation of the national socio-economic system of Russia], pp. 92-97.

Makarov, I.N., Drobot, E.V., Levchegov, O.N. (2020) Zelenaya ekonomika, tsifrovyye tekhnologii i nanoinstrumentariy: osnovnyye bazy transformatsii proizvodstvennykh sistem v Yevraziyskom ekonomicheskom soyuze [Green economy, digital technologies and nanotools: the main bases for the transformation of production systems in the Eurasian Economic Union], *Journal of International Economic Affairs*, vol. 10, no. 3, pp. 719-742.

Petrosyan, V.S., Tikhonova, I.O., Epifantsev, A.S., Shchelchikov, K.A., Tsvetkova, E.A. (2021) Opyt sozdaniya promyshlennogo simbioza predpriyatiy khimicheskoy promyshlennosti [Experience in creating industrial symbiosis of chemical industry enterprises], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, vol. 25, no. 8, pp. 28-33.

Skobelev, D.O. (2020) Promyshlennaya politika povysheniya resursoeffektivnosti i dostizheniye tseley ustoychivogo razvitiya [Industrial policy for increasing resource efficiency and achieving sustainable development goals], *Journal of New Economy*, vol. 21, no. 4, pp. 153-173.

Smirnova, T.S., Golub, O.V. (2024) Monitoring realizatsii otraslevoy programmy «Primeneniye vtorichnykh resursov i vtorichnogo syr'ya iz otkhodov v promyshlennom proizvodstve» [Monitoring the implementation of the industry program "Use of secondary resources and secondary raw materials from waste in industrial production"], *Ekonomika ustoychivogo razvitiya*, no. 2 (58), pp. 232-237.

Tolstykh, T.O., Geraskina, A.A., Shchelchikov, K.A. (2024a) Perspektivy ekonomiki zamknutogo tsikla v Rossii na etape global'nykh vyzovov [Prospects for a closed-loop economy in Russia at the stage of global challenges], *Ekonomika ustoychivogo razvitiya*, no. 2 (58), pp. 252-257.

Tolstykh, T.O., Geraskina, A.A., Shchelchikov, K.A. (2024b) Podkhody k formirovaniyu kriteriyev otsenki effektivnosti promyshlennykh simbiozov [Approaches to the formation of criteria for assessing the effectiveness of industrial

symbioses], *Region: sistemy, ekonomika, upravleniye* [Region: Systems, Economics, Management], no. 2 (65), pp. 113-125.

Utkina, E.E. (2020) Analiz i klassifikatsiya sposobov otsenki promyshlennosimbioticheskikh vzaimodeystviy [Analysis and classification of methods for assessing industrial-symbiotic interactions], *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta im. G.V. Plekhanova*, vol. 17, no. 5 (113), pp. 26-41.

Khachaturov, A.E., Guseva, T.V., Molchanova, Ya.P. (2023) Menedzhment innovatsiy kak instrument obespecheniya ustoychivogo razvitiya [Innovation management as a tool for ensuring sustainable development], *Menedzhment v Rossii i za rubezhom*, no. 4, pp. 39-47.

Tskhovrebov, E.S. (2022) Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii [Biosphere compatibility: man, region, technology], *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii*, no. 4 (40), pp. 116-135.

Shubov, L.Ya. Doronkina, I.G., Smirnova, T.S., Golub, O.V. (2023) Promyshlennaya politika modernizatsii resursoyemkikh otrasley [Industrial policy for the modernization of resource-intensive industries], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], no. 2, pp. 29-35.

Houssam, N., Ibrahiem, D., Sucharita, S., El-Aasar, K., Easily, R., Sethi, N. (2023) Assessing the Role of Green Economy on Sustainable Development in Developing Countries, *Heliyon*, vol. 9(6), e17306, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17306.

Статья поступила в редакцию (Received): 30.10.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 28.11.2024.

Для цитирования / For citation:

Шушпанова, Д.В., Якушина, А.М., Тихонова И.О., Голуб, О.В. (2024) Анализ состояния отрасли по обращению с отходами производства и потребления в контексте климатической повестки, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 3-4, с. 56-72, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-56-72.

Shushpanova, D.V., Yakushina, A.M., Tikhonova, I.O. Golub, O.V. (2024) Industrial and household waste management industry status analysis in the context of climate agenda, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXV, no. 3-4, pp. 56-72, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-56-72.

**Уточнение оценок выбросов метана
от крупного рогатого скота в национальном кадастре
антропогенных выбросов парниковых газов на территории
Российской Федерации**

В.Ю. Вертянкина

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107058, Москва, ул. Глебовская, 20Б

*Адрес для переписки: victoria_vert@mail.ru

Реферат. В статье приводятся результаты работы, выполненной в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»: «Техническое перевооружение, цифровизация и актуализация Национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, совершенствования сбора исходных данных». Целью работы являлось уточнение пересчетных параметров и национальных коэффициентов, применяемых для оценки выбросов метана от отрасли животноводства в Национальном кадастре РФ.

Выбросы метана в результате процессов внутренней ферментации домашних животных и от систем сбора, хранения и использования навоза относятся к ключевой категории выбросов в аграрном секторе Российской Федерации. Наибольший вклад в выбросы от данных категорий вносят крупный рогатый скот молочного и мясного направления. Уточнение значений коэффициента перевариваемости, валовой энергии и коэффициента эмиссии метана позволит дать более точные оценки эмиссий метана с учетом национальных особенностей.

Ключевые слова. Парниковые газы, сельское хозяйство, животноводство, метан, изменение климата.

**Refinement of estimates of methane emissions from cattle
in the national inventory of anthropogenic emission
of greenhouse gases on the territory of the Russian Federation**

V.Yu. Vertyankina

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

*Correspondence address: victoria_vert@mail.ru

Abstract. The article presents the results of the work carried out within the framework of the implementation of the most important innovative project of state purpose ‘Unified National System for Monitoring of Climate Active Substances’: ‘Technical re-equipment, digitalisation and updating of the National Inventory of anthropogenic emissions by sources and absorption by sinks of greenhouse gases, improvement of initial data collection’. The purpose of the work was to clarify the conversion parameters and national coefficients used to estimate methane emissions from the livestock sector in the National Inventory of the Russian Federation.

Emissions from enteric fermentation and manure management systems are a key category in the agricultural sector of the Russian Federation. The largest contribution to emissions from these categories comes from dairy and non-dairy cattle. Refinement of the digestibility coefficient, gross energy and methane emission factor will provide more accurate estimates of methane emissions taking into account national specifics.

Keywords. Greenhouse gas, agriculture, livestock, methane, climate change.

Введение

Отрасль животноводства относится к одной из ведущих отраслей в аграрном секторе страны, которая обеспечивает потребность населения в мясной и молочной продукции. Согласно Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК) и Парижскому соглашению выбросы следующих парниковых газов: CO₂, CH₄, N₂O подлежат обязательной ежегодной инвентаризации во всех странах-участниках РКИК, включая Российскую Федерацию. По данным Национального кадастра суммарный выброс парниковых газов в секторе «Сельское хозяйство» в 2021 году составил 121.28 млн тонн CO₂ экв., что соответствует 7.2 % (с учетом сектора ЗИЗЛХ) и 5.6 % (без учета сектора ЗИЗЛХ) от совокупных выбросов на территории Российской Федерации за 2021 год (НДК, 2023).

По данным Национального кадастра (НДК, 2023) в секторе «Сельское хозяйство» учитываются выбросы в области животноводства и растениеводства. В области животноводства проводятся оценки эмиссий метана (CH₄) в результате процессов внутренней ферментации сельскохозяйственными животными и от систем сбора, хранения и использования навоза.

Как видно из рис. 1 выбросы парниковых газов от категорий внутренней ферментации и систем сбора, хранения и использования навоза составляют 33.8% (38705.0 тыс. тонн CO₂ экв.) и 11.2 % (13561.09 тыс. тонн CO₂ экв.) от общих суммарных выбросов в секторе соответственно.

Наибольший вклад в выбросы в результате внутренней ферментации вносят КРС молочного и мясного направлений. Вклад крупного рогатого скота мясного направления в суммарные выбросы от категории внутренней ферментации в 2021 году составил 43.19% (599.25 тыс. тонн CO₂ экв.), а КРС молочного направления составил – 41.80% (680.37 тыс. тонн CO₂ экв.),

остальные 15.01% выбросов приходятся на буйволов, овец, коз, верблюдов, лошадей, мулов, ослов, свиней, северных оленей, кроликов и пушных животных) (268.54 тыс. тонн CO₂ экв.).



Рисунок 1. Вклад категорий выбросов парниковых газов в секторе Сельское хозяйство, %

Figure 1. Contribution of greenhouse gas emission categories in the agriculture sector, %

Основным фактором, влияющим на снижение выбросов парниковых газов в аграрном секторе страны, является поголовье сельскохозяйственных животных. Согласно официальным статистическим данным Росстата (<https://rosstat.gov.ru>) с 1990 года суммарное поголовье скота в стране сократилось почти в 1.4 раза. Поголовье коров, овец и коз сократилось более чем в 2.6 раза, остальное поголовье крупного рогатого скота – в 3.8 раза (НДК, 2023).

Цель данной работы заключалась в уточнении основных параметров расчета национальных коэффициентов эмиссии метана с учетом особенностей ведения отрасли животноводства в стране.

Важность разработки национальных коэффициентов выбросов метана в результате внутренней ферментации сельскохозяйственных животных на основе данных по конкретной стране также отмечается в литературных источниках на международном уровне. При проведении анализа научно - исследовательской литературы авторы отмечают, что применение значений коэффициентов эмиссии метана рассчитанных с использованием национальных данных по конкретной стране дает более точные оценки выбросов (Thakuri et al, 2020), что соответственно приводит к уменьшению значений неопределённости (Ibidhi et al, 2021). Также большинство промышленно развитых стран, таких как Канада, Япония, Дания и Ирландия используют методы, основанные на национальных данных при проведении инвентаризации выбросов парниковых газов в результате внутренней ферментации (Ominski et al, 2007). Кроме того, в ряде стран с целью уточнения оценки выбросов метана в результате внутренней ферментации для прогнозирования оценок выбросов применяют математические модели (Ramin, Huntanen, et al, 2013; Yan et al, 2000) с использованием данных по конкретной стране (National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan, 2022).

Методы и материалы

Для расчета выбросов метана в результате внутренней ферментации КРС мясного и молочного направлений использовались методы расчетного мониторинга, которые применяются при составлении национальной отчетности РФ в соответствии с требованиями РКИК ООН (МГЭИК, 2006).

Расчет эмиссий CH_4 в результате внутренней ферментации проводился с использованием формулы 1:

$$\text{CH}_4 = \frac{EF_T \cdot N_T}{10^6}, \quad (1)$$

где EF_T – коэффициент выбросов для установленного поголовья скота, кг CH_4 /гол. год;

N_T – количество голов вида/категории скота Т в регионе.

Коэффициент выбросов CH_4 в результате внутренней ферментации рассчитывался с использованием формулы 2:

$$EF = \left[\frac{GF \cdot \left(\frac{Y_m}{100} \right) \cdot 365}{55.65} \right], \quad (2)$$

где: EF – коэффициент выбросов, кг CH_4 / голова x год;

GE – валовое потребление энергии, МДж/ голова * сутки;

Y_m – коэффициент преобразования метана, процентная доля валовой энергии в корме, преобразованная в метан, равный 0.065

Коэффициент 55.65 (МДж/ кг CH_4) представляет собой энергосодержание метана.

Коэффициент эмиссии от систем сбора, хранения и использования навоза рассчитывался с использованием формулы 3:

$$EF = (VS \cdot 365) \cdot \left[Bo \cdot 0.67 \cdot \sum_{s,k} \frac{MCF(S,k)}{100} \cdot MS(T, S, k) \right], \quad (3)$$

где: $EF(T)$ – коэффициент годовых выбросов CH_4 для заданной категории/подкатегории Т скота и птицы, кг CH_4 / животное * год;

$VS(T)$ – суточное выделение летучего твердого вещества для заданной категории /подкатегории Т скота и птицы, кг сух. вещества / животное * год;

365 – основа для расчета годового производства VS, сутки/год.

$Bo(T)$ – максимальная метанопродуцирующая способность для навоза скота (помета птицы) категории/ подкатегории Т, $\text{м}^3 \text{CH}_4$ / кг выделенных VS;

0.67 – коэффициент преобразования $\text{м}^3 \text{CH}_4$ в килограммы CH_4 ;

$MCF(S,k)$ – коэффициенты преобразования метана для каждой системы S сбора и хранения навоза и помета по климатическому региону k , %;

$MS(T,S,k)$ – доля навоза (помета птицы) от категории/подкатегории T скота, которая обрабатывается с использованием определенной системы S сбора и хранения навоза и помета в климатическом регионе k , не имеет размерности.

Расчет валового потребления энергии проводился по формуле 4:

$$GE = \frac{\left(\frac{NEm + NEa + NEl + NEp}{REM} \right) + \left(\frac{NEg}{REG} \right)}{\frac{DE\%}{100}}, \quad (4)$$

где: GE = валовая энергия, МДж/сутки;

NEm = чистая энергия, необходимая для поддержания животного, МДж/сутки;

NEa = чистая энергия для физической активности животного, МДж/сутки;

NEl = чистая энергия для лактации (для молочных коров), МДж/сутки;

NEp = чистая энергия, необходимая для беременности (для молочных коров), МДж/сутки;

REM = отношение чистой энергии в рационе, доступной для поддержания, к потребляемой перевариваемой энергии;

NEg = чистая энергия, необходимая для роста, МДж/сутки;

REG = отношение чистой энергии в рационе, доступной для роста, к потребляемой перевариваемой энергии;

$DE\%$ = коэффициент переваримости, %.

Отношение чистой энергии в рационе, доступной для поддержания, к потребляемой перевариваемой энергии рассчитывалось с применением формулы 5:

$$REM = [1.123 - (4.092 \cdot 10^{-3} \cdot DE\%) + [1.126 \cdot 10^{-5} \cdot (DE\%)^2] - (25.4/DE\%)], \quad (5)$$

где: REM = отношение чистой энергии в рационе, доступной для поддержания, к потребляемой перевариваемой энергии;

$DE\%$ = коэффициент переваримости, %.

Отношение чистой энергии в рационе, доступной для роста, к потребляемой перевариваемой энергии рассчитывалось с применением формулы 6:

$$REG = [1.164 - (5.160 \cdot 10^{-3} \cdot DE\%) + [1.138 \cdot 10^{-5} \cdot (DE\%)^2] - (37.4/DE\%)], \quad (6)$$

где: REG = отношение чистой энергии в рационе, доступной для роста, к потребляемой перевариваемой энергии;

$DE\%$ = коэффициент переваримости, %.

Данные о поголовье скота, средней живой массе, суточном приросте КРС, продуктивности молочных коров были взяты из отчетных материалов, официальных статистических изданий Росстата (<https://rosstat.gov.ru>). Согласно Руководящим принципам МГЭКИ (МГЭИК, 2006) при проведении оценок эмиссий парниковых газов рекомендуется использовать среднегодовое поголовье скота, в связи с чем для перевода статистических данных в среднегодовое поголовье использовались поправочные коэффициенты, которые на 2021 год составили для КРС мясного – 1.027, для КРС молочного – 1.008. Поправочные коэффициенты были получены путем расчета среднегодовых изменений поголовья КРС мясного и молочного направлений за каждый месяц по отношению к поголовью на 1 января (в долях) (НДК, 2023).

Результаты расчетов

Как видно из приведенных выше формул 4-6 одним из основных параметров, используемых для оценки эмиссий метана от крупного рогатого скота является коэффициент переваримости кормов. Под переваримостью подразумевается свойство питательных веществ корма переходить под воздействием пищеварительных соков в растворимое состояние и становится доступным для всасывания стенками пищеварительного тракта животных. В процессе пищеварения корм подвергается механическому (измельчение, разжевывание), затем химическому (действие ферментов) и биологическому (действие микроорганизмов, особенно интенсивное у жвачных) воздействию. Под влиянием этих процессов из разложившихся веществ, входящих в состав кормов, выделяются аминокислоты, моносахариды, жирные кислоты, витамины и растворимые соли, усваиваемые организмом.

На сегодняшний день в Национальном кадастре (НДК, 2023) оценка выбросов метана в результате внутренне ферментации от КРС молочного и мясного направлений по сложности соответствует Уровню 2 Руководящих принципов МГЭИК (МГЭИК, 2006). Для расчета значений валовой энергии применяются справочные значения коэффициентов переваримости кормов с разделением по основным видам кормов в рационе животных (Шпакова и др., 1991). Однако, по результатам проверки международной группы экспертов по проверке кадастров РККИК ООН часто возникают замечания, касающиеся несогласованности и неточности оценок расчета валовой энергии и коэффициента эмиссии метана с рационом кормления КРС для ряда областей на территории РФ (например: Брянской, Московской и Ленинградской областей) (Report on the individual review..., 2020).

В связи с чем было принято решение провести работы по уточнению значений коэффициентов переваримости для КРС молочного и мясного направлений с подразделением по основным видам кормов: концентрированные корма (без учета комбикормов); комбикорма; грубые корма и сочные корма. Уточнение значений коэффициентов было проведено согласно анализу научно – исследовательской литературы.

В табл. 1 представлены уточненные значения коэффициента переваримости кормов для КРС молочного и мясного направлений, в целом для территории РФ, а также для сравнения приведены значения, используемые в Национальном кадастре (НДК, 2023).

Таблица 1. Коэффициенты переваримости для КРС молочного и мясного направлений

Table 1. Digestible coefficients for dairy and non - dairy cattle

Показатель	Вид корма, кг				
	Концен- траты (без комбикорма)	Комби- корма	Грубые корма	Сочные корма	Пастбищ- ные корма
Крупный рогатый скот мясной					
DE, % (по Шпа- кову, 1991 год)	80.29	84.37	61.68	66.30	66.12
DE, % (уточнен- ный)	78.48	82.47	60.29	64.81	64.63
КРС молочный					
DE, % (по Шпа- кову, 1991 год)	80.29	84.37	61.68	66.30	66.12
DE, % (уточнен- ный)	78.90	82.91	60.61	65.15	64.98

Из представленных данных в табл. 1 видно, что уточненные значения коэффициентов переваримости основных видов кормов, используемых в рационе кормления животных, несколько ниже, применяемых ранее для оценок выбросов метана в Национальном кадастре (НДК, 2023). На основе представленных данных было рассчитано средневзвешенное значение коэффициента, которое использовалось в дальнейшем для расчета уточненного значения коэффициентов эмиссий метана. Так, средневзвешенное значение коэффициента переваримости кормов для 2021 года для крупного рогатого скота молочного направления составило 69.04%, что меньше на 1.7% по сравнению с используемым ранее значением, и 67.3% для КРС мясного направления, что на 2.3% меньше, по сравнению с ранее используемыми значениями.

На основе полученных средневзвешенных значений коэффициентов переваримости были рассчитаны значения валовой энергии (GE) для КРС молочного и мясного направлений за период с 1990 по 2021 год и проведен расчёт по оценке эмиссий метана в результате внутренней ферментации. Значения валовой энергии (GE), коэффициента эмиссии для КРС молочного и мясного направления за период с 1990 по 2021 год представлено в табл. 2.

Уточненные значения коэффициентов эмиссий метана превышают значения коэффициентов, используемых при оценка парниковых газов в Национальном кадастре, что соответственно отражается в целом на оценке эмиссий метана от КРС молочного и мясного направлений. Значения эмиссий метана в

2021 году выросло на 2.4 % для КРС молочного направления и на 3.5 % для КРС мясного направления по сравнению с данным кадастра.

За период с 1990 по 2021 год наблюдается общий тренд сокращения выбросов КРС молочного направления в 2021 году по сравнению с базовым 1990 годом на 55.1%, а от КРС мясного направления на 68.0%. В целом, при сравнении суммарных значений с данными кадастра в категории внутренняя ферментация в результате уточнения значений коэффициентов отмечается рост эмиссий метана на 2.5 % (1.0 млн тонн CO₂ экв.) за 2021 год.

На рис. 2 представлена диаграмма сравнения выбросов метана в результате процессов внутренней ферментации от КРС молочного и мясного направлений по данным кадастра и с учетом уточненных параметров.

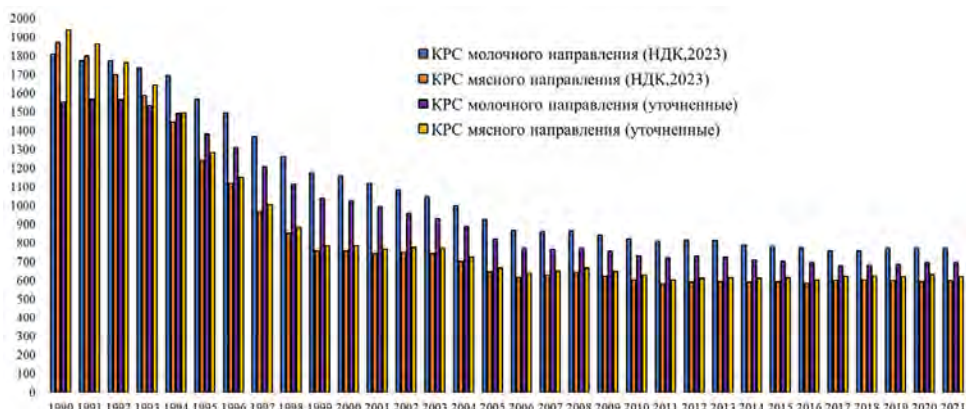


Рисунок 2. Диаграмма сравнения выбросов метана в результате процессов внутренней ферментации от КРС молочного и мясного направлений, тыс. тонн

Figure 2. Comparison of emissions from dairy and non - dairy cattle as a result of enteric fermentation, thousand tons

Еще одним значимым источником выбросов в секторе сельское хозяйство являются выбросы метана от систем сбора, хранения и использования навоза. Согласно Руководящим принципам МГЭИК (МГЭИК. 2006) термин «навоз» используется в общем смысле и включает как навоз/помет, так и мочу (т.е. сухие и жидкие вещества), которые выделяются скотом. Метан образуется в результате разложения навоза в анаэробных условиях. Условия для этого создаются тогда, когда животные содержатся на ограниченных площадках и там, где навоз утилизируется в жидкостных системах. Существенный вклад в образование выбросов метана от систем сбора, хранения и использования навоза на территории РФ, по аналогии с выбросами от внутренней ферментации, вносят отходы животноводства от крупного рогатого скота (НДК, 2023).

Оценка эмиссий метана от систем сбора, хранения и использования навоза от КРС молочного и мясного направлений производилась с применением аналогичной методики, что и в результате внутренней ферментации.

которая по сложности соответствует Уровню 2 Руководящих принципов МГЭИК (МГЭИК, 2006). На рис. 3 представлена диаграмма сравнения значений эмиссий метана от систем сбора, хранения и использования навоза по данным кадастра и рассчитанные с использованием уточненных значений коэффициентов.

Результаты расчета коэффициентов эмиссий метана от категории системы сбора, хранения и использования навоза для КРС молочного и мясного направлений с применением уточненных значений коэффициента переваримости кормов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения валовой энергии и национального коэффициента эмиссии метана для КРС молочного и мясного направлений

Table 2. Estimated values of gross energy and country-specified methane emission factor for dairy and non - dairy cattle

Год	Значение GE для КРС мясного направления	Значение GE для КРС молочного направления	Значение национального коэффициента эмиссии метана (EF)			
			в результате внутренней ферментации для КРС мясного направления	в результате внутренней ферментации для КРС молочного направления	от систем сбора, хранения и использования навоза для КРС мясного направления	от систем сбора, хранения и использования навоза для КРС молочного направления
1990	113.8	171.8	48.5	73.3	4.8	3.2
1991	114.1	175.8	48.6	75.0	4.8	3.3
1992	115.5	175.4	49.2	74.8	4.8	3.3
1993	114.8	174.3	48.9	74.3	4.7	3.2
1994	114.9	173.4	49.0	73.9	4.6	3.2
1995	115.3	172.9	49.2	73.7	4.5	3.2
1996	115.5	172.8	49.2	73.7	4.5	3.2
1997	116.4	175.3	49.6	74.8	4.5	3.3
1998	116.1	176.7	49.5	75.3	4.4	3.3
1999	117.0	177.8	49.9	75.8	4.3	3.3
2000	117.7	179.7	50.2	76.6	4.3	3.4
2001	117.3	180.5	50.0	76.9	4.2	3.4
2002	116.5	180.6	49.7	77.0	4.1	3.4
2003	116.7	182.2	49.8	77.7	4.0	3.4
2004	117.1	184.1	49.9	78.5	4.0	3.4
2005	117.0	184.7	49.9	78.7	3.5	3.4
2006	119.6	186.2	51.0	79.4	3.7	3.4
2007	120.4	187.6	51.3	80.0	3.7	3.5
2008	121.7	191.0	51.9	81.4	3.7	3.5
2009	121.3	191.7	51.7	81.7	3.5	3.5
2010	122.2	191.8	52.1	81.8	3.5	3.5
2011	123.9	193.1	52.8	82.3	3.6	3.5

2012	125.7	193.8	53.6	82.6	3.6	3.6
2013	126.4	194.3	53.9	82.8	3.6	3.6
2014	128.0	195.3	54.6	83.3	3.6	3.6
2015	131.1	197.9	55.9	84.4	3.7	3.6
2016	130.6	200.0	55.7	85.3	3.7	3.7
2017	136.5	199.4	58.2	85.0	3.8	3.7
2018	138.0	200.0	58.8	85.2	3.8	3.6
2019	137.9	201.2	58.8	85.8	3.0	3.6
2020	141.7	203.2	60.4	86.6	3.1	3.7
2021	139.4	204.6	59.4	87.2	3.0	3.7

Уточненные значения коэффициентов эмиссий метана для КРС молочного направления ниже используемых значений коэффициентов в кадастре на 9.8% по данным на 2021 года. Для КРС мясного направления уточненные значения коэффициента превышают используемые в кадастре на 3.6%. По сравнению с базовым годом выбросы от КРС молочного направления сократились на 55.8%, от КРС мясного направления увеличились в среднем на 83.4%.

В целом в категории системы сбора, хранения и использования навоза применение уточненных коэффициентов эмиссий в 2021 году привело к сокращению общих выбросов метана на 0.9% и составило 5872.7 тыс. тонн CO₂ экв.

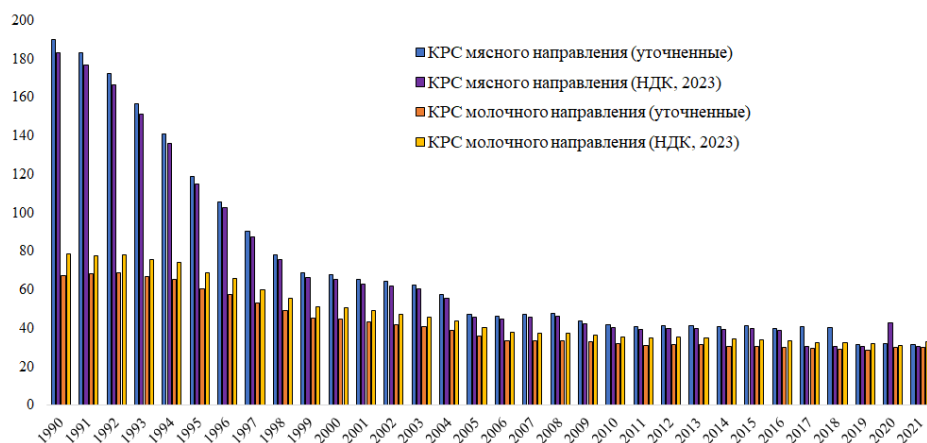


Рисунок 3. Диаграмма сравнения выбросов метана от систем сбора, хранения и использования навоза от КРС молочного и мясного направлений, тыс. тонн

Figure 3. Comparison of methane emissions from manure management systems from dairy and non - dairy cattle, thousand tons

Таким образом, в результате уточнения значений коэффициентов в категориях внутренняя ферментация домашних животных и системы сбора, хранения и использования навоза общее суммарное значение эмиссии по данным 2021 года составило 1821.6 тыс. тонн или 45540.9 тыс. тонн CO₂ экв. соответственно, что меньше по сравнению с полученными значениями в кадастре на 3.0 % (или на 1391.9 тыс. тонн CO₂ экв.).

Заключение

Проведение работ по уточнению значений основных параметров (коэффициента переваримости, валовой энергии), используемых для расчета коэффициентов эмиссий метана позволило провести более точную оценку выбросов с учетом национальных особенностей рационов кормления сельскохозяйственных животных на территории РФ.

По сравнению с данными, представленными в кадастре (НДК, 2023), полученные уточненные оценки в отрасли животноводства позволяют сделать вывод о недоучете выбросов метана от крупного рогатого скота мясного направления в результате процессов внутренней ферментации. Для крупного рогатого скота молочного направления отмечается сокращение выбросов по сравнению с данными, представленными в кадастре. В категории системы сбора, хранения и использования навоза отмечается такая же ситуация, для крупного рогатого скота молочного направления уточнение значения коэффициента эмиссии приводит к уменьшению выбросов метана, а для крупного рогатого скота мясного направления к увеличению.

Работа выполнена в рамках реализации ключевого результата важнейшего инновационного проекта государственного назначения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 3240-р).

Автор выражает благодарность сотрудникам Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) за помощь в проведении анализа и уточнении статистических данных.

Список литературы

Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия. утвержденная постановлением Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717.

Федеральная научно – техническая программа развития сельского хозяйства на 2017-2030 годы (актуализированная Указом Президента Российской Федерации от 3 декабря 2021 года, № 687.

Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства РФ от 8 сентября 2022 года № 2567-р), электронный ресурс: G3hzRytGPbmFAfBFgmEhxTrec694MaHp.pdf (government.ru) дата обращения 02.12.2023)

Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации (Утверждена указом Президента Российской Федерации от 21.01.2020 года

№ 20), электронный ресурс: Указ Президента Российской Федерации от 21.01.2020 г. № 20 Президент России (kremlin.ru) дата обращения 02.12.2023).

Парижское соглашение. Женева: ООН (2015) 30 с., http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf.

Росстат (2021) *Российский статистический ежегодник*, Стат. Сборник, М., (<https://rosstat.gov.ru>).

РКИКООН (1992) UNFCCC. United Nation Framework Convention on Climate Change, UNEP/IUC, 29 p.

МГЭИК (2006) *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 года. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов*. Под ред. Иглестон Х.С., Буэндия Л., Мива К., Нгара Т. Танабе К. Япония: ИГЕС. Т. 4. Часть 1. Часть 2.

НДК (2023) *Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, разработан и представлен в соответствии с обязательствами Российской Федерации по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата и Киотскому протоколу к Рамочной Конвенции ООН об изменении климата.*

Попов, И.С. (1966) *Методика зоотехнических опытов*.

Шпаков, А.П., Назаров, В.К., Певзнер, И.Л., Пахомов, И.Я. (1991) *Кормовые нормы и состав кормов. Справочное пособие*, Минск, Ураджай, 384 с.

Thakuri, S., Baskota, P., Khatri, S.B., Dhakal, A., Chaudhary, P., Rijal, K., Bhanju, R.M. (2020) Methane emission factors and carbon fluxes from enteric fermentation in cattle of Nepal Himalaya, *Science of The Total Environment*, vol. 746, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141184>.

Ibidhi, R., Kim, T.-H., Bharanidharan, R., Lee, H.-J., Lee, Y.-K., Kim, N.-Y., Kim, K.-H. (2021) Developing Country-Specific Methane Emission Factors and Carbon Fluxes from Enteric Fermentation in South Korean Dairy Cattle Production, *Sustainability*, vol. 13 (16), pp. 1-11, <https://doi.org/10.3390/su13169133>.

Ominski, K.H., Boadi, D.A., Wittenberg, K.M., Fulawka, D.L., Basarab, J.A. (2007) Estimates of enteric methane emissions from cattle in Canada using the IPCC Tier-2 methodology, *Can. J. Anim. Sci.*, vol. 87, pp. 459-467, <https://doi.org/10.4141/CJAS06034>.

Ramin, M., Huntanen, P. (2013) Development of equations for predicting methane emission from ruminants, *Journal of Dairy Science*, vol. 96., issue 4, pp. 2476-2493, <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6095>.

Yan, T., Agnew, R.E., Gordon, F.J., Porter, M.G. (2000) Prediction of methane energy output in dairy and beef cattle offered grass silage-based diets, *Livestock Production Science*, vol. 64, issue 2-3, pp. 253-263, [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00145-1](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00145-1).

National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan (2022) <https://unfccc.int/documents/461933>.

Report on the individual review of the annual submission of the Russian Federation submitted in 2020 (2020) URL:<https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/green-house-gas-inventories-annex-i-parties/inventory-review-reports/inventory-review-reports/inventory-review-reports-2018> (дата обращения 12.11.2024).

References

Gosudarstvennaya programma razvitiya selskogo khozyastva i regulirovaniya rynkov selskoxozyajstvennoj produkcii i. syryai prodovolstviya. utverzhennaya postanovleniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 14 iulya 2012 g. № 717 [State program for the development of agriculture and regulation of agricultural markets, raw materials and food. approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of July 14] (2012), no. 717, Moscow, Russia.

Federalnaya nauchno – texnicheskaya programma razvitiya selskogo khozyajstva na 2017 - 2030 gody (aktualizirovannaya Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 3 dekabrya 2021 goda [Federal scientific and technical program for the development of rural agriculture for 2017-2030 (updated by the President of the Russian Federation on December 3, 2021)] № 687, Moscow, Russia.

Strategiya razvitiya agropromyshlennogo i ryboxozyajstvennogo kompleksa Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda (utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 8 sentyabrya 2022 goda № 2567-r). [Strategy for the development of the agro-industrial and fisheries complex of the Russian Federation for the period up to 2030 (approved by the Order of the Government of the Russian Federation of September 8 (2022) no. 2567-r)], elektronnyy resurs G3hzRyrGPbm-FAfBFgmEhxTrec694MaHp.pdf (government.ru) data obrasheniya 02.12.2023), Moscow, Russia.

Doktrina prodovolstvennoj bezopasnosti Rossijskoj Federacii (Utverzhdena ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 21.01.2020 goda № 20) (elektronnyy resurs Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 21.01.2020 g. № 20 Prezident Rossii (kremlin.ru) [Doctrine of Food Security of the Russian Federation (Approved by the Decree of the President of the Russian Federation dated 21.01.2020 No. 20), (electronic resource Decree of the President of the Russian Federation dated 21.01.2020 No. 20 President of Russia (kremlin.ru) date of access 02.12.2023)] datao brashheniya 02.12.2023), Moscow, Russia.

Parizhskoe soglasenie. Zheneva, OON. (2015) 30 p. http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf.

Rosstat (2021) Rossijskij statisticheskij ezhegodnik. Stat. Sbornik, Rosstat (2021) [Russian statistical yearbook. Article. Collection, M], Moscow, Russia, (<https://rosstat.gov.ru>).

RKIKOON. (1992) UNFCCC. *United Nation Framework Convention on Climate Change*, UNEP/IUC. UNFCCC, 29 p.

MGEIK (2006) *Rukovodyashhie principy` nacional`ny`x inventarizacij parnikovyx`gazov MGE`IK 2006 goda. Programma MGE`IK po nacional`ny`m kadastram parnikovyx`gazov. Pod red. Igleston X. S., Bue`ndia L., Miva K., Ngara T. Tanabe K. Yaponiya: IGES. T. 4. Chast 1. Chast 2.*[PCC (2006) 2006 IPCC [Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme. Edited by Eagleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. Japan: IGES. Vol. 4, Part 1, Part 2.]

НДК (2023) *Nacionalniy doklad o kadastre antropogennyx vybrosov I zistrochnikov I absorbcii poglotitelyami parnikovyx gazov ne reguliruemym Monrealskim protokolom razrabotan I predstavljen v sootvetstvii s obyazatelstvami Rossijskoj Federaciipo Ramochnoj Konvencii OON ob izmenenii klimata I Kiotskomu protokolu k Ramochnoj Konvencii OON ob izmenenii klimata* [National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases. not regulated by the Montreal Protocol. developed and submitted in accordance with the obligations of the Russian Federation under the UN Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on Climate Change].

Popov, I.S. (1966) *Metodika zootekhnicheskix opytov* [Methodology of zootechnical experiments], Moscow, Russia.

Shpakov, A.P., Nazarov, V.K., Pevzner, I.L., Paxomov, I.Ya. (1991) *Kormovie normy I sostav kormov, Spravochnoe posobie* [Feed standards and feed composition] Reference manual, Minsk, Uradzhaj, 384 p.

Thakuri, S., Baskota, P., Khatri, S.B., Dhakal, A., Chaudhary, P., Rijal, K., Bhanju, R.M. (2020) Methane emission factors and carbon fluxes from enteric fermentation in cattle of Nepal Himalaya, *Science of The Total Environment*, vol. 746, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141184>.

Ibidhi, R., Kim, T.-H., Bharanidharan, R., Lee, H.-J., Lee, Y.-K., Kim, N.-Y., Kim, K.-H. (2021) Developing Country-Specific Methane Emission Factors and Carbon Fluxes from Enteric Fermentation in South Korean Dairy Cattle Production, *Sustainability*, vol. 13 (16), pp. 1-11, <https://doi.org/10.3390/su13169133>.

Ominski, K.H., Boadi, D.A., Wittenberg, K.M., Fulawka, D.L., Basarab, J.A. (2007) Estimates of enteric methane emissions from cattle in Canada using the IPCC Tier-2 methodology, *Can. J. Anim. Sci.*, vol. 87, pp. 459-467, <https://doi.org/10.4141/CJAS06034>.

Ramin, M., Huntanen, P. (2013) Development of equations for predicting methane emission from ruminants, *Journal of Dairy Science*, vol.96., issue 4, pp. 2476-2493, <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6095>.

Yan, T., Agnew, R.E., Gordon, F.J., Porter, M.G. (2000) Prediction of methane energy output in dairy and beef cattle offered grass silage-based diets, *Livestock Production Science*, vol. 64, issue 2-3, pp. 253- 263, [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00145-1](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00145-1).

National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan (2022) <https://unfccc.int/documents/461933>.

Report on the individual review of the annual submission of the Russian Federation submitted in 2020 (2020), URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/inventory-review-reports/inventory-review-reports/inventory-review-reports-2018>.(data obrashheniya 12.11.2024).

Статья поступила в редакцию (Received): 17.10.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 17.12.2024.

Для цитирования / For citation

Вертянкина, В. Ю. (2024) Уточнение оценок выбросов метана от крупного рогатого скота в национальном кадастре антропогенных выбросов парниковых газов на территории Российской Федерации, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 3-4, с. 73-87, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-73-87.

Vertyankina, V. Yu. (2024) Refinement of estimates of methane emissions from cattle in the national inventory of anthropogenic emission of greenhouse gases on the territory of the Russian Federation, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXV, № 3-4, с. 73-87, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-73-87.

Об ошибках обращения с коэффициентом корреляции Пирсона

Максимова 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 статье рассматриваются опорные вопросы, важные для понимания при работе с коэффициентом корреляции Пирсона. Всегда ли правомерна и надежна интерпретация полученных результатов по рассчитанному коэффициенту корреляции Пирсона и что нужно при этом учитывать? Ответы на этот и многие другие вопросы даны в статье. Корреляционный анализ ничего не доказывает и не устанавливает причинно-следственных связей. Коэффициент корреляции не может сам по себе без знания природы данных использоваться для демонстрации того, истинна или ложна теория. Приведены частные примеры и контрпримеры, отражающие ключевые свойства рассматриваемого коэффициента корреляции, которые позволяют достигать понимания правильного применения его на практике. Даны общие практические рекомендации с целью получения достоверных выводов.

Ключевые слова. Коэффициент корреляции Пирсона, выборка, выбросы, ложная корреляция, скалярное произведение, линейная регрессия.

On the errors of handling the Pearson correlation coefficient

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,
4, Leninsky pr., Moscow, 119049, Russian Federation

*Correspondence address: o-maximova@yandex.ru

Abstract. The article discusses the basic questions that are important to understand when working with the Pearson correlation coefficient. Is it always

valid and reliable to interpret the results obtained using the calculated Pearson correlation coefficient and what should be taken into account? Answers to this and many other questions are given in the article. Correlation analysis does not prove anything and does not establish cause-and-effect relationships. The correlation coefficient alone can not, without knowledge of the nature of the data, be used to demonstrate whether a theory is true or false. Specific examples and counter-examples are given that reflect the key properties of the correlation coefficient in question, enabling an understanding of its correct application in practice. General practical advice is given in order to draw valid conclusions.

Keywords. Pearson correlation coefficient, sampling, outliers, false correlation, scalar product, linear regression.

*П.Л. Чебышев и его последователи остаются постоянно
на реальной почве, руководствуясь взглядом,
что только те изыскания имеют цену,
которые вызываются приложениями (научными или
практическими), и только те теории действительно полезны,
которые вытекают из рассмотрения частных случаев.*

А.М. Ляпунов

Вводная часть

Коэффициентом корреляции Пирсона оперируют во многих исследованиях: от биологических до политических. Затрагиваемые здесь вопросы не новы и общеизвестны. Однако, как отмечал в своих работах выдающийся физик Ричард Фейнман, о многих научных истинах имеет смысл задумываться заново и повторять их (Фейнман, 2023).

Обратимся к историческим причинам и задачам, приведшим ученых того времени к необходимости ввести корреляцию. Термин «корреляция» уходит корнями в исследования в области ботаники и антропологии. Ввел этот термин французский палеонтолог Жорж Кювье в XVIII в., чтобы описать «связь как синхронность». Его глубокие познания в анатомии животных позволили восстанавливать облик вымерших существ по их сохранившимся костям. В статистике же слово «корреляция» первым стал использовать выдающийся английский географ, метеоролог и статистик Фрэнсис Гальтон¹⁾ в конце XIX в. Все началось с горошка... (рис.1). Как и Мендель, Гальтон экспериментировал с выращиванием душистого горошка, он проводил анализ размеров его потомства, которое, как оказалось, регрессировало от распределения его родителей (работа Менделя в то время была неизвестна, она была заново открыта в 1900 г.).

¹⁾<http://galton.org/> (дата обращения 11.11.2024)

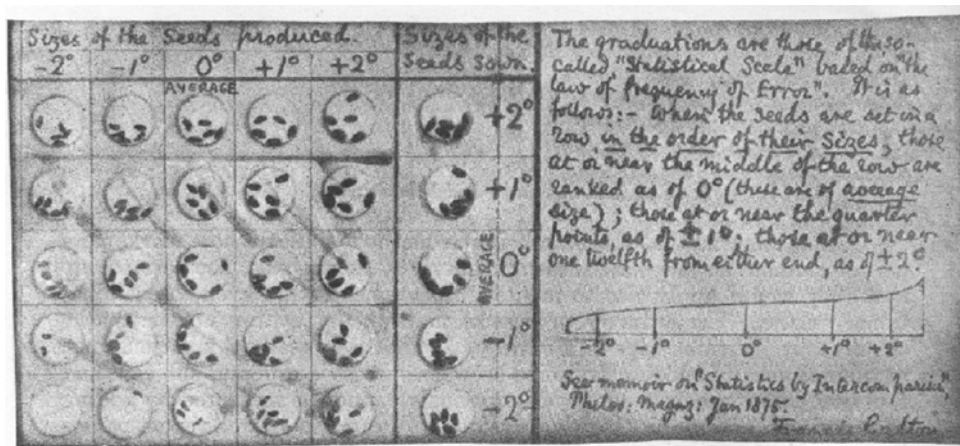


Рисунок 1. Результаты экспериментов с потомством семян душистого горошка, проводимых Френсисом Гальтоном в 1894 г.

Figure 1. Results of experiments with the progeny of sweet pea seeds conducted by Francis Galton in 1894

Позднее Гальтон загорелся идеей измерения характеристик человека, проявляя все больший интерес к наследственности. Однако ему стало ясно, что статистическое исследование данных надежно только при работе с большими выборками, ввиду чего он создал «Антропометрическую лабораторию», которая в 1885 г. на Международной выставке здравоохранения, проходившей в Лондоне, тестировала посетителей этой выставки с помощью инструментов, которые Гальтон часто проектировал сам и изготавливал по своим чертежам (рис. 2). Примером подобной взаимосвязи, найденной Гальтоном, является корреляция длины ноги у пропорционально сложенного человека с длиной руки. Эта большая работа, и более поздние результаты привели к введению теоретических понятий «регрессия» и «корреляция». Но сам Гальтон не мог полноценно математически обработать такой объем данных. Статистический подход Гальтона заинтриговал выдающегося математика того времени, впоследствии и ставшего его другом и учеником, Карла Пирсона, который основал биометрическую школу и обеспечил решающее формирование теоретических концепций, заложенных Гальтоном.

Так начался длинный путь применения до сих пор востребованного коэффициента корреляции Пирсона, который активно применяется и сегодня, в частности, для обоснования надежности результатов наблюдений (Rummel, 1976). Но всегда ли правомерна и надежна интерпретация полученных результатов по рассчитанному коэффициенту корреляции и что нужно при этом учитывать? Ответы на этот и многие другие вопросы будут даны далее.



Рисунок 2. «Антропометрическая лаборатория», которая была включена в Международную выставку здравоохранения, проходившую в Лондоне в 1885 г.

Picture 2. 'Anthropometric Laboratory' which was included in the International Health Exhibition held in London in 1885

Что особенного в формуле коэффициента корреляции Пирсона?

Часто недопонимание основ построения коэффициента корреляции приводит к неверным расчетам, и как следствие, ошибочным прогнозам и сомнительным выводам (Максимова, 2023). Вспомним формулу *выборочного коэффициента корреляции Пирсона* величин X и Y :

$$\hat{r}_{XY} = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\hat{\sigma}_X \cdot \hat{\sigma}_Y}, \quad (1)$$

где

$$\hat{\sigma}_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad \hat{\sigma}_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}}.$$

В первую очередь отметим, что в коэффициенте корреляции присутствует случайность, так как его находят по данным, в которых также заложена случайность. Поэтому к нему нельзя относиться как к постоянной величине.

Во-вторых, у тех, кто впервые знакомится с формулой (1), возникает вопрос, почему в знаменателе этой формулы стоят именно оценки стандарт-

ных отклонений $\hat{\sigma}_X$ и $\hat{\sigma}_Y$, а не исправленные оценки $s_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ и $s_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$, которые часто используются при анализе выборочных

данных в качестве оценки стандартных отклонений. На самом деле, этот вопрос очень непрост. Отчасти ответ кроется в лучших статистических свойствах выборочного коэффициента корреляции, рассчитанного с применением $\hat{\sigma}_X$ и $\hat{\sigma}_Y$. Выборочный коэффициент корреляции $\hat{r}_{XY}$, рассчитанный по формуле (1) с использованием $\hat{\sigma}_X$ и $\hat{\sigma}_Y$, является состоятельной оценкой коэффициента корреляции, но смещенной. Такое смещение может быть существенным для малых выборок, но величина смещения убывает с увеличением объема выборки и при $n > 30$ уже становится практически пренебрежимой (Кобзарь, 2012). Но, в целом, понятно, что использование s_X и s_Y вместо $\hat{\sigma}_X$ и $\hat{\sigma}_Y$ в формуле (1) может привести к совершенно иным результатам и иногда к дальнейшим ошибочным расчетам корреляционно-регрессионного анализа, так как выборочный коэффициент корреляции и угловой коэффициент прямой линии регрессии связаны между собой формульно. Приведем пример.

Пример 1. На рис. 3 представлена диаграмма рассеяния для смоделированных случайно значений двух признаков X и Y . Коэффициент корреляции, рассчитанный по формуле (1), равен $\hat{r}_{XY} = 0.86$. Однако, если вместо $\hat{\sigma}_X$ и $\hat{\sigma}_Y$ в формулу (1) подставить s_X и s_Y , то получим значение $\hat{r}_{XY} = 0.69$. Данная разница в полученных значениях весьма ощутима для прикладных исследований, особенно в условиях наличия выборок малого объема. Но с ростом n эта разница визуально становится не так заметна. Однако оценивать величину расхождения, как мы увидим в следующем пункте, имеет смысл только совместно с объемом выборки.

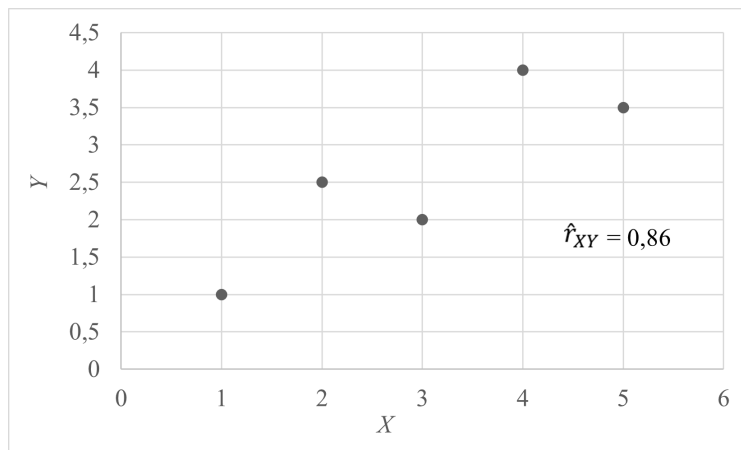


Рисунок 3. Диаграмма рассеяния для смоделированных значений двух признаков X и Y

Figure 3. Scatter diagram for modeled values of two attributes X and Y

Общим выводом служит факт, что потеря полного диапазона значений одной из переменных или недостаточность объема данных могут давать промежуточные, не всегда правдоподобные, результаты, и по мере накопления данных необходимо проверять выдвигаемую изначально гипотезу и соответствующие выводы, увеличивая тем самым их надежность.

Коэффициент корреляции и шкала Чеддока, так ли все однозначно?

Если по выборке значение коэффициента корреляции $\hat{r}_{XY} \neq 0$, то возникает вопрос о том, считать его большим или нет для дальнейшей работы. Во многих прикладных исследованиях для ответа на этот вопрос пользуются шкалой Чеддока (табл. 1). Однако не все так однозначно.

Таблица 1. Шкала Чеддока для оценки тесноты корреляционной связи

Table 1. Cheddock scale for assessing the closeness of the correlation

Количественная мера тесноты связи $ \hat{r}_{XY} $	Качественная характеристика силы связи
0.1-0.3	Слабая
0.3-0.5	Умеренная
0.5-0.7	Заметная
0.7-0.9	Сильная
0.9-1.0	Очень сильная

Дело в том, что коэффициент корреляции чувствителен как к самим данным (а именно, к выделяющимся наблюдениям – выбросам), так и к их количеству (Орлов, 2018; Гржибовский и др., 2020). А критические значения критерия Стьюдента проверки значимости коэффициента корреляции зависят от объема выборки, поэтому использование шкалы Чеддока для интерпретации результата в целом некорректно, и однозначно сразу выводы о его величине делать нельзя. Для признания значимыми небольших коэффициентов корреляции требуются гораздо более объемные выборки, чем для больших. Это хорошо иллюстрирует следующий пример.

Пример 2. На рис. 4 приведены две диаграммы рассеяния модельных данных: а) объема выборки $n = 50$ и $\hat{r}_{XY} = 0.4$, б) объема выборки $n = 8$ и $\hat{r}_{XY} = 0.6$. Несложно проверить, что в первом случае следует признать выборочный коэффициент корреляции $\hat{r}_{XY} = 0.4$ значимым на уровне 5% ($|t_{\text{расч}}| = 3.023 > t_{\text{кр}} = 2.011$), а во втором $\hat{r}_{XY} = 0.6$ – незначимым на уровне 5 % ($|t_{\text{расч}}| = 1.837 < t_{\text{кр}} = 2.447$).

Пример 2 демонстрирует, что ошибочно принимать решение о том, велик ли коэффициент корреляции или нет, без анализа объема выборки и, соответственно, не применив соответствующий статистический критерий проверки его значимости.

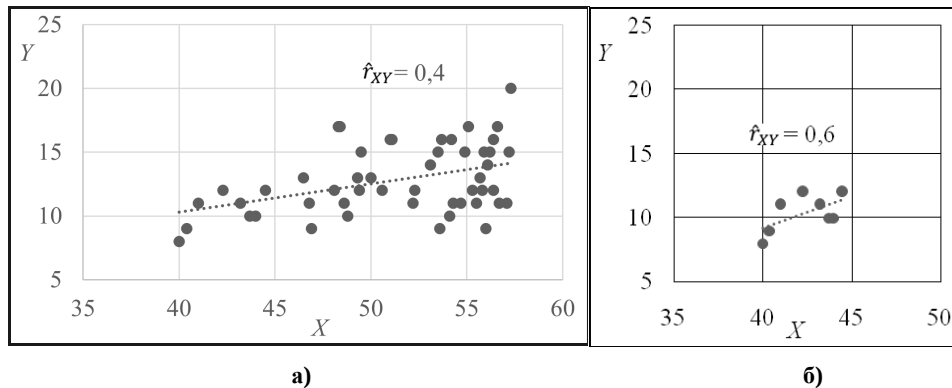


Рисунок 4. Диаграммы рассеяний для: а) объема выборки $n = 50$, б) объема выборки $n = 8$

Picture 4. Scatter plots for: a) sample size $n = 50$, b) sample size $n = 8$

Коэффициент корреляции и данные, распределенные не по нормальному закону

Вообще говоря, коэффициент корреляции Пирсона можно рассчитать между любыми количественными и интересующими исследователя признаками. Это связано с тем, что по своей структуре коэффициент корреляции (1) представляет собой скалярное произведение векторов наблюдений после незначительных преобразований (Максимова, 2023). Однако для ответа на вопрос проверки его значимости необходим критерий Стьюдента, который накладывает ряд ограничений.

Первое ограничение – это объем данных. Установлено, что при объеме выборки $n > 10$ распределение случайной величины $t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \cdot \sqrt{n-2}$ удовлетворительно аппроксимируется распределением Стьюдента с $(n-2)$ степенями свободы (Кобзарь, 2012).

Второе ограничение – нормальный закон распределения данных. Группа ученых провела исследования распределений статистики Стьюдента корреляционного анализа для законов, отличающихся от нормального (более островершинных и плосковершинных, но симметричных), в которых было показано, что значимого изменения предельных распределений статистик не происходит. Это существенно расширяет сферу корректного применения методов классического корреляционного анализа в приложениях (Лемешко, Помадин, 2002). Но это вовсе не значит, что мы можем пренебрегать законом распределения данных, мы лишь допускаем возможность работы с коэффициентом корреляции и его интерпретации при нарушении этого условия. Поэтому, как отмечалось ранее, важно накапливать данные и проводить повторные исследования для принятия/отвержения выдвинутой гипотезы. Как отмечал великий математик Рональд Фишер: «Нулевая гипотеза никогда не доказывается и не подтверждается, но, возможно, опровергается в ходе

экспериментов. Можно сказать, что каждый эксперимент существует только для того, чтобы факты могли опровергнуть нулевую гипотезу».

Коэффициент корреляции и причинно-следственные связи

Всем известны случаи, когда неверная интерпретация высокого коэффициента корреляции приводит к ложным умозаключениям. И некоторые из таких умозаключений весьма увлекательны, как, например, высокая связь между числом свивших гнезда в южных районах Швеции аистов и рождаемостью в эти же годы (Matthews, 2000), между числом утонувших в бассейне и числом фильмов, выпущенных с Николасом Кейджем (Tyler Vigen, 2015), между количеством экономических преступлений и численностью студентов в регионе (Благовещенский, 2009) и др. Вся причина в том, что расчетная формула (1) дает результат, который показывает сопряженность изменения признаков, но никак не позволяет устанавливать причинно-следственные связи. В случае, когда такая причинно-следственная связь не имеет смысла, говорят о *ложной корреляции* (Благовещенский, 2009). Причины такого феномена могут быть разные:

а) действие третьего фактора, вызывающее одновременный рост двух изучаемых признаков,

б) наличие целых групп (кластеров) или единичных выделяющихся наблюдений, внутри которых корреляции нет, а при этом все они, объединенные в одну выборку, группируются достаточно хорошо около одной прямой и дают высокое значение коэффициента корреляции,

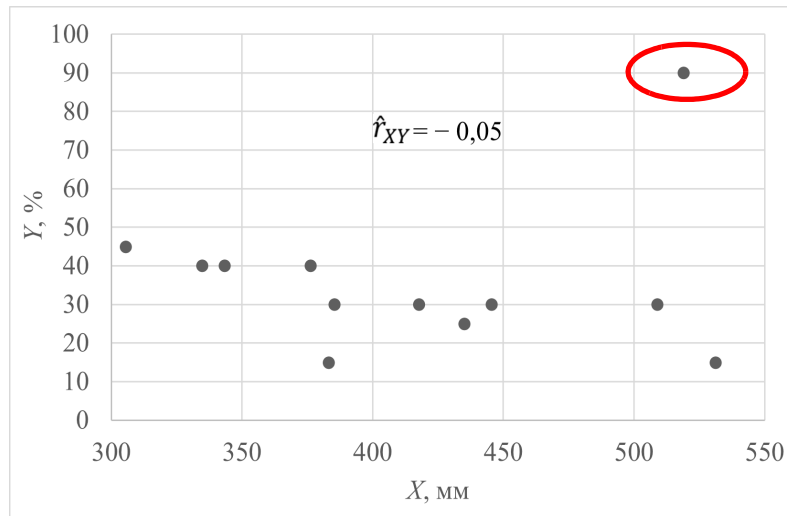
в) случайные совпадения, обусловленные конфигурацией/особенностями выборки.

Приведем далее примеры по каждому случаю.

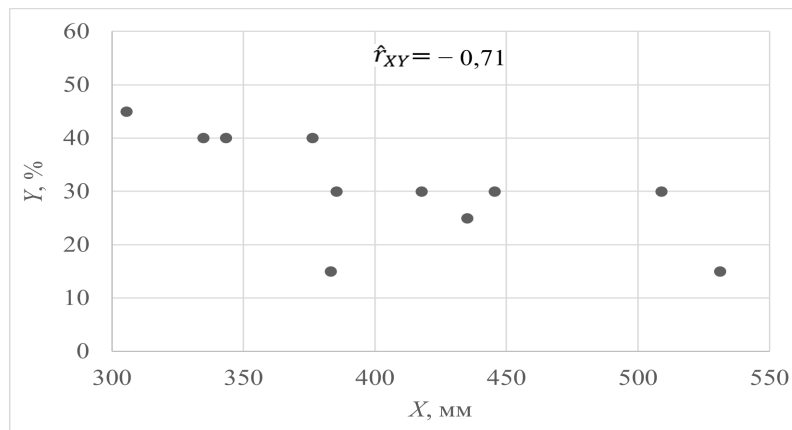
Пример 3. Примером ложной корреляции для случая а) может служить связь между числом преступлений в городе и числом обучающихся студентов (Благовещенский, 2009). Но и тот, и другой признак связаны с численностью населения города, которая напрямую влияет как на численность студентов этого города, так и на количество преступлений. Тем самым, в больших городах, как правило, будет и большее число студентов, и число преступлений, а в малых – наоборот.

Пример 4. Для случая б) приведем модельный пример, основанный на реальных данных. На рис. 5 представлены диаграммы рассеяния связи смоделированных данных суммарных годовых осадков с величиной депигментации хвои сосны обыкновенной с выделяющимся наблюдением (а) и без него (б). Причины такого выделяющегося наблюдения могут быть разные: повреждение дерева бобрами, ошибка в записи и в измерении, прошедший полосой низовой пожар и т.п. После удаления выброса коэффициент корреляции изменится со значения $\hat{r}_{XY} = -0.05$ до значения $\hat{r}_{XY} = -0.71$.

Важно иметь в виду, что в таком случае, если мы собираемся просто выбросить некоторое наблюдение или целый кластер наблюдений без их анализа, то мы теряем заметную часть информации, которая в них спрятана.



а)



б)

Рисунок 5. Диаграммы рассеяний связи моделированных данных суммарных годовых осадков с величиной депигментации: а) с выбросом, б) без выброса

Figure 5. Scatter plots of the relationship of modeled total annual precipitation data with depigmentation value: а) with outlier, б) without outlier

Пример 5. Случай в) встречается редко. Пример такой ситуации приведен в работе (Максимова, Кухта, Коротков, 2023): при анализе воздействия климатических факторов на линейные приросты сосны обыкновенной в заповеднике «Кивач» выявлено наличие значимой связи между осадками и температурами на заданном временном промежутке. Однако известно, что такая связь не носит причинный характер, и ее можно считать случайной.

Итак, корреляционный анализ ничего не доказывает. Коэффициент корреляции не может сам по себе без знания природы данных использоваться для демонстрации того, истинна или ложна теория.

Корреляция во времени и пространстве

Если данные представлены временными рядами, то простой расчет коэффициента корреляции может давать некорректные результаты. Рассмотрим пример, приведенный в работе (Максимова, Кухта, 2024).

Пример 6. Изучается связь двух временных рядов модельных значений. На рис. 6 изображены значения смоделированного примера: слева два ряда во времени (ряд 1 и ряд 2), а справа – диаграмма рассеяния в пространстве для смоделированных значений. Показатели на рис. 6 слева явно демонстрируют как близость данных во времени, так и синхронность по монотонности, которая нарушается лишь для двух временных периодов ($N = 5$, $N = 15$).

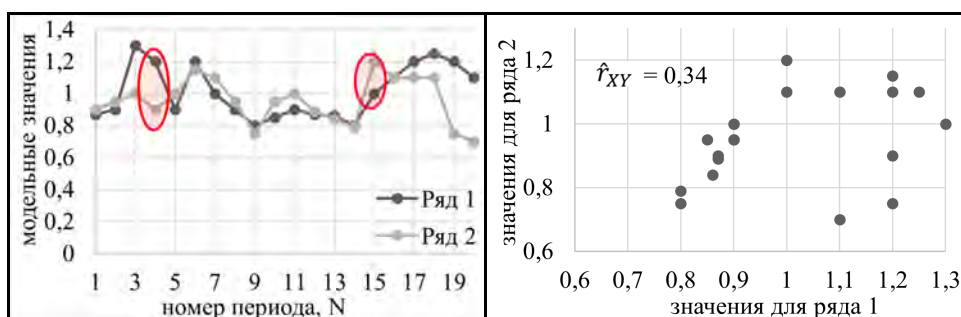


Рисунок 6. Смоделированные значения двух динамических рядов и их диаграмма рассеяния

Picture 6. Simulation values of two dynamic series and their scatter plot

Казалось бы, возникает гипотеза о тесной связи. Однако восприятие результатов меняется, если построить диаграмму рассеяния для рядов 1 и 2, убрав компоненту времени. На рис. 6 справа при удалении временной компоненты диаграмма рассеяния демонстрирует слабую связь: коэффициент корреляции составляет лишь $\hat{r}_{XY} = 0.34$. Тем самым, продемонстрировано, что коэффициент корреляции Пирсона лишь отчасти учитывает сопряженность динамических рядов по характеру монотонности на каждом временном промежутке. В такой постановке задачи нужны специальные методы анализа рядов динамики (Мхитарян и др., 2008).

Диаграмма рассеяния и первичные выводы

Известно, что визуализация данных, пройдя долгий исторический путь совершенствования, часто играет важную роль в разведывательном анализе (Friendly, 2007). На рис. 7 приведены диаграммы рассеяния, составленные для одних и тех же данных, но при разном выбранном масштабе для вертикальной оси. Заметно при этом, как меняется восприятие корреляции, которая составила лишь значение $\hat{r}_{XY} = 0.1$. Это, в свою очередь, показывает важность математических критериев для интерпретации результатов, которая обсуждалась выше.

Критерии не позволяют вводить себя в заблуждение графиками и кажущейся логичностью подобной аргументации. Но, помимо этого, на рис. 7 продемонстрирован и другой интересный факт, который можно встретить преимущественно в теории.

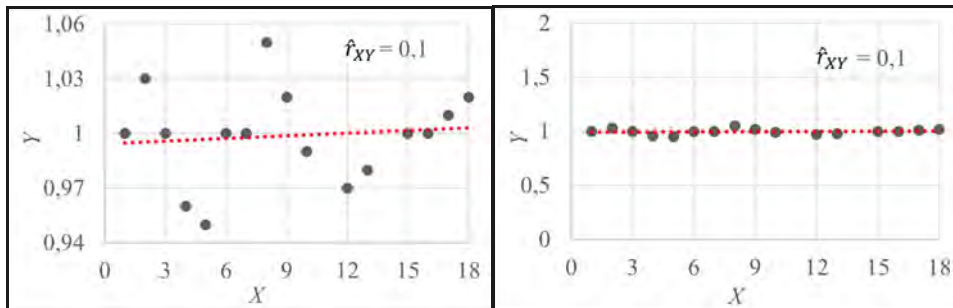


Рисунок 7. Диаграммы рассеяния для модельных данных в разных масштабах

Picture 7. Scatterplots for model data at different scales

Задумаемся, всегда ли «строгая» линейная связь между данными приводит к коэффициенту корреляции Пирсона $r_{XY} = \pm 1$? Невероятно, но – нет! Рассмотрим рис. 8, который можно воспринимать близким к рис. 7. Значения признака Y при изменении признака X на рис. 8 не меняются, однако точки ложатся на прямую. Чему равен коэффициент корреляции в этом случае? С одной стороны, следуя умозаключениям Кювье, который вводил корреляцию как синхронность признаков, на рис. 8 $r_{XY} = 0$. Но вспоминая, что коэффициент корреляции показывает силу линейной связи, возникает догадка, что $r_{XY} = 1$ или $r_{XY} = -1$. Но ни тот, ни другой вариант неверен.

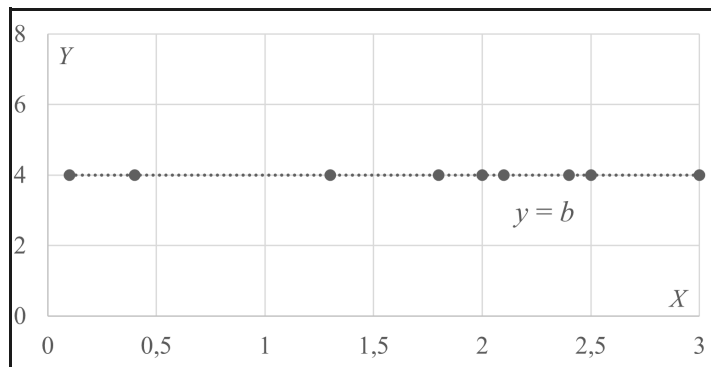


Рисунок 8. Пример линейной регрессии

Figure 8. Linear regression example

Дело в том, что в таком случае $\hat{\sigma}_Y = 0$, и коэффициент корреляции (1) не определен. На практике такая ситуация практически невозможна, за исключением случаев, когда округление значений признака столь грубо, что задает равные значения (и это можно исправить), либо когда действительно значения признака Y не изменяются с ростом X .

Заключение

В работе даны ответы на часто задаваемые вопросы, такие как: почему знак коэффициента корреляции показывает направленность связи и почему так устроена его формула? Насколько правомерно пользоваться шкалой Чеддока без применения математических критериев в прикладных исследованиях? Всегда ли высокий выборочный коэффициент корреляции интерпретируем и значимо отличен от нуля? Насколько оправдан для интерпретации расчет корреляции между признаками во времени для оценки синхронности соответствующих рядов?

Результатом приведенных объяснений может служить общая практическая рекомендация с целью получения достоверных выводов, которая состоит в нескольких постулатах. При исследовании взаимосвязи между признаками необходимо:

- знать природу происхождения и получения данных для дальнейшего анализа; учитывать, проведены ли измерения в пространстве или во времени;
- проанализировать, насколько выявление корреляционной связи оправдано (если причинно-следственная связь не имеет смысла, то полученная связь может демонстрировать ложную корреляцию);
- анализировать первично данные на наличие выделяющихся наблюдений (выбросов) и целых кластеров выделяющихся наблюдений и выявлять их природу для понимания причины дальнейшей стратегии исследования;
- интерпретировать коэффициент корреляции осторожно, так как он носит случайный характер и зависит как от объема выборки, так и от строения самих данных, и пользоваться критериями, так как просто графическая визуализация может приводить к некорректным выводам.

Корреляционный анализ ничего не доказывает. Коэффициент корреляции не может сам по себе без знания природы данных использоваться для демонстрации того, истинна или ложна теория. Поэтому нельзя позволять вводить себя в заблуждение, например, графиками эмпирических наблюдений и кажущейся логичностью такой аргументации. Приведение частных примеров и контрпримеров, отражающих ключевые характерные свойства рассматриваемого коэффициента корреляции, позволяют достигать понимания правильного применения его на практике.

В заключение, вспомним высказывание: «Кто трижды смело предсказывал погоду и угадал, в глубине души немного верит в свой пророческий дар» (*Фридрих Ницше*). А вот повысить точность своего прогноза и принимаемых решений можно, применив иногда даже очень простые статистические инструменты.

Список литературы

Благовещенский, Ю.Н. (2009) *Тайны корреляционных связи в статистике, Серия «Библиотека Солев», М., «Научно-издательский центр ИНФРА-М», «Научная книга», 158 с.*

Гржибовский, А.М., Горбатова, М.А., Наркевич, А.Н., Виноградов, К.А. (2020) Объем выборки для корреляционного анализа, *Морская медицина*, т. 6, № 1, с.101-106, doi10.22328/2413-5747-2020-6-1-101-106.

Кобзарь, А.И. (2012) *Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников*, 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.

Максимова, О.В., Кухта, А.Е. (2024) Об особенностях сравнения динамических рядов параметров хода роста сосны обыкновенной в разных типах местообитаний, *Стандарты и качество*, № 13, с. 55-61.

Максимова, О.В., Кухта, А.Е., Коротков, С.А. (2023) Воздействие черного углерода и других климатических факторов на линейные приросты сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris* L.) на территории заповедника «Кивач», *Лесной вестник/Forestry Bulletin*, т. 27, № 5, с. 48-59, doi:10.18698/2542-1468-2023-5-48-59.

Максимова, О.В. (2023) *Математическая статистика и анализ данных. Учебное пособие*, М., Издательский Дом НИТУ МИСИС, 172 с.

Мхитарян, В.С., Архипова, М.Ю., Балаш, В.А. и др. (2008) *Эконометрика*, М., Изд-во Проспект, 384 с.

Орлов, А.И. (2018) Ошибки при использовании коэффициентов корреляции и детерминации, *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, № 84(3), с. 68-72, doi:10.26896/1028-6861-2018-84-3-68-72.

Фейнман Р. (2023) *Наука, не-наука и все-все-все*, М., АСТ, 192 с.

Friendly, M. (2007) A brief history of data visualization, *Handbook of Data Visualization. Springer Handbooks Comp. Statistics. Springer*, Berlin, Heidelberg, pp. 15-56, https://doi.org/10.1007/978-3-540-33037-0_2

Matthews, R. (2000) Storks Deliver Babies ($p = 0.008$), *Teaching Statistics*, 22(2), pp. 36-38.

Rummel, R.J. (1976) *Understanding Correlation*, ch. 5.

Tyler Vigen *Spurious Correlations*. Hachette Books (2015) 208

p.

References

Blagoveshchenskij, Yu.N. (2009) *Tajny korrelyacionnyh svyazi v statistike* [Secrets of correlation in statistics], Seriya «Biblioteka Soley», «Nauchno-izdatel'skij centr INFRA-M», «Nauchnaya kniga», Moscow, Russia, 158 p.

Grzhibovskij, A.M., Gorbatova, M.A., Narkevich, A.N., Vinogradov, K.A. (2020) Ob'em vyborki dlya korrelyacionnogo analiza [Required sample size for

correlation analysis], *Morskaya medicina*, vol. 6, no. 1, pp. 101-106, doi 10.22328/2413-5747-2020-6-1-101-106.

Kobzar', A.I. (2012) *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov I nauchnyh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists], Fizmatlit, Moscow, Russia, 816 p.

Lemeshko, B.Yu., Pomadin, S.S. (2002) Korrelyacionnyj analiz nablyudenij mnogomernykh sluchajnykh velichin pri narushenii predpolozhenij o normal'nosti [Impact of black carbon and other climatic factors on linear growth of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) in the territory of the Kivach nature reserve [Correlation analysis of observations of multidimensional random variables in violation of assumptions about normality], *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki*, vol. 5, no. 3(11), pp. 115-130.

Maksimova, O.V., Kuhta, A.E. (2024) Ob osobennostyah sravneniya dinamicheskikh ryadov parametrov hoda rosta sosny obyknovennoj v raznyh tipah mestoobitanij, [On the Peculiarities of Comparison of Dynamic Series of Parameters of Scots Pine Growth Course in Different Types of Habitats], *Standarty i kachestvo-Standards and Quality*, no.13, pp. 55-61.

Maksimova, O.V., Kuhta, A.E., Korotkov, S.A. (2023) Vozdejstvie chernogo ugleroda I drugih klimaticheskikh faktorov na linejnye prirosty sosny obyknovennoj (*Pinus Sylvestris* L.) na territorii zapovednika «Kivach» [Impact of black carbon and other climatic factors on linear growth of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) in the territory of the Kivach nature reserve], *Lesnoj vestnik*, vol. 27, no. 5. pp. 48-59, doi: 10.18698/2542-1468-2023-5-48-59.

Maksimova, O.V. (2023) *Matematicheskaya statistika I analiz dannyh: Uchebnoe posobie* [Mathematical statistics and data analysis], Izdatel'skij Dom NITU MISIS, Moscow, Russia, 172 p.

Mhitaryan, V.S., Arhipova, M.Yu., Balash, V.A. i dr. (2008) *Ekonometrika* [Econometrics], Izd-vo Prospekt, Moscow, Russia, 384 p.

Orlov, A.I. (2018) Oshibki pri ispol'zovanii koefficientov korrelyacii i determinacii [Errors in the use of correlation and determination coefficients], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov-Industrial laboratory. Materials diagnostics*, no. 84(3), pp. 68-72, doi: 10.26896/1028-6861-2018-84-3-68-72.

Feynman R. (2023) *Nauka, ne-nauka i vse-vse-vse* [Science, non-science and everything-everything-everything], Izd-vo AST, Moscow, Russia, 192 p.

Friendly, M. (2007) A brief history of data visualization, *Handbook of Data Visualization. Springer Handbooks Comp. Statistics. Springer*, Berlin, Heidelberg, pp. 15-56. https://doi.org/10.1007/978-3-540-33037-0_2.

Matthews, R. (2000) Storks Deliver Babies ($p=0.008$), *Teaching Statistics*, 22 (2), pp. 36-38.

Rummel, R.J. (1976) *Understanding Correlation*, ch. 5.

Tyler Vigen *Spurious Correlations. Hachette Books* (2015) 208 p.

Статья поступила в редакцию (Received): 15.11.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 25.11.2024.

Для цитирования / Forcitation

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.

Maksimova, O.V. (2024) On errors in handling Pearson's correlation coefficient, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXV, № 3-4, с. 88-102, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-88-102.

Тюльпан Биберштейна в Восточном Подмосковье

Г.А. Карпова, В.П. Захаров*

ГКУ МО «Мособллес»,
Россия, 143082, Московская область, Одинцовский городской округ, деревня Раздоры,
Рублёво-Успенское шоссе, 1-й километр

*Адрес для переписки: zakharov@forest.ru

Реферат. Приводятся сведения о находке популяции тюльпана Биберштейна (*Tulipa biebersteiniana* Schult. et Schult. fil.) в Орехово-Зуевском городском округе Московской области. Наблюдения показывают увеличение числа вегетирующих и цветущих экземпляров растения в месте обнаружения, несмотря на воздействие антропогенной нагрузки и регулярное затопливание местообитания весенними паводками. Даются предположения о характере появления данной популяции.

Ключевые слова. Тюльпан Биберштейна, Красная книга.

Bieberstein's Tulip in the Eastern Moscow region

G.A. Karpova, V.P. Zakharov*

GKU MO «Mosoblles»,
Razdory village, Rublevo-Uspenskoe highway, 1st kilometer, 144082, Odintsovo urban district,
Moscow region, Russian Federation

*Correspondence address: zakharov@forest.ru

Abstract. Information is provided on the discovery of a population of the Bieberstein tulip in the Orekhovo-Zuyevsky urban district of the Moscow region. Observations show an increase in the number of vegetating and flowering plant specimens at the detection, despite the impact of anthropogenic stress and regular flooding of the habitat by spring floods. Assumptions are made about the nature of the appearance of this population.

Keywords. Bieberstein's tulip, Red Data Book.

Тюльпан Биберштейна (*Tulipa biebersteiniana* Schult. et Schult. fil.) в пределах Московской области обычно отмечается в южных районах в левобережной части долины реки Оки в виде немногочисленных разрозненных популяций (Щербаков и др., 2017). Данный вид включён в Красную книгу Московской области как сокращающийся в численности (2-я категория) и находящийся на северной границе ареала (Октябрёва, 2008). В то же время, в последние годы появились сведения об обнаружении тюльпана Биберштейна

на правом берегу реки Клязьма в Гороховецком районе Владимирской области (Серёгин, 2001).

В 2020 г. во время проведения Всемирного чемпионата по документации городского биоразнообразия, проводимого по инициативе проекта «Флора России» (Seregin et al., 2020), в городе Орехово-Зуево на правом берегу реки Клязьмы было обнаружено пять экземпляров тюльпана, в том числе один цветущий экземпляр (рис. 1).



Рисунок 1. Первая находка тюльпана Биберштейна в Орехово-Зуеве
(фото Г.А. Карповой)

Figure 1. The first discovery of the Bieberstein's tulip in Orekhovo-Zuyevo
(photo by G.A. Karpova)

Несмотря на расположение вблизи оживлённых прогулочных маршрутов, а также периодическое затопление весенними паводками, популяция постепенно увеличивается. В ходе ежегодных обследований отмечались цветущие экземпляры. Весной 2024 г. было зафиксировано увеличение цветущих растений до 8 штук, общее количество вегетирующих растений достигло тридцати (рис. 2).

Таким образом, данное место (55.816686; 39.002364) стало самой северной в Московской области точкой произрастания *Tulipa biebersteiniana* (рис. 3). Окружающее прирусловое насаждение состоит из узкой ленты тополей со вторым ярусом из клёна ясенелистного, черёмухи обыкновенной, берёзы повислой, яблони домашней с примесью кустарниковых видов ивы.

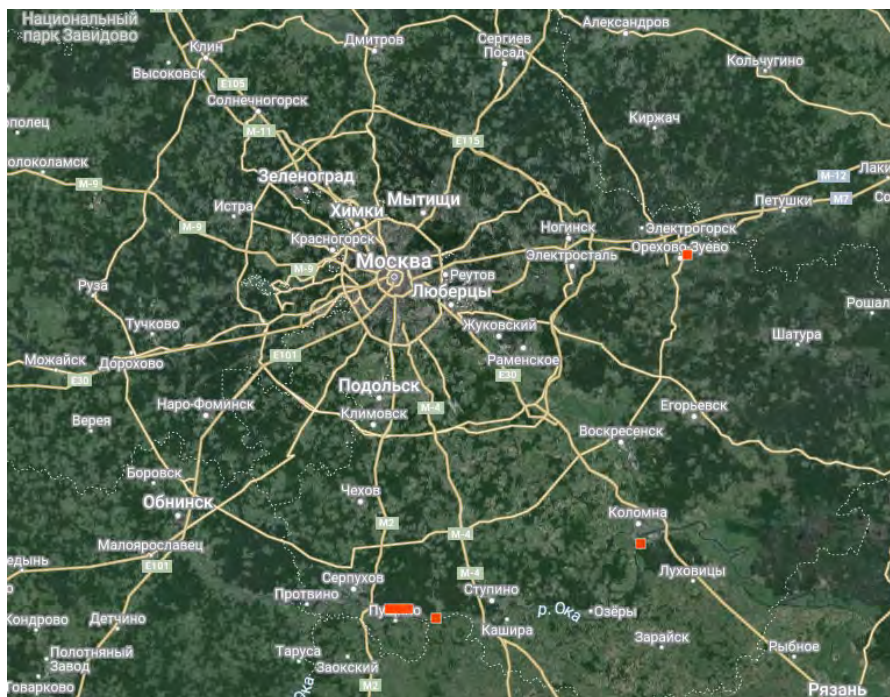


Рисунок 3. Места встреч тюльпана Биберштейна, зарегистрированные на платформе iNaturalist.org (на данном ресурсе название вида используется в форме синонима *Tulipa sylvestris* ssp. *australis* (Link) Pamp.)

Figure 3. The location of the finds of the Bieberstein's tulip, registered on iNaturalist.org (under another name of the species is used as the name *Tulipa sylvestris* ssp. *Australian* (link) Pump.)

Учитывая близость городской застройки и воздействие антропогенной нагрузки на территорию, в качестве наиболее вероятной версии происхождения данной популяции можно принять занос. Тем не менее, принимая во внимание новые находки тюльпана Биберштейна в Московской, Владимирской, Тульской областях, по-видимому, необходимо целенаправленное проведение весенних обследований долин рек Клязьмы и Оки по поиску мест его произрастания.

Список литературы

- Октябрьева, Н.Б. (2008) *Тюльпан Биберштейна*, Красная книга Московской области, 2-е изд., перераб. и доп., М., с. 536.
- Серёгин, А.П. (2001) *Tulipa biebersteiniana* Schult. et Schult. fil. на северном пределе распространения, *Изучение природы бассейна Оки: тез. докл. Межрегион. науч.-практ. конф. «Река Ока – третье тысячелетие»*, Калуга, с. 59-61.
- Щербаков, А.В., Смирнова, Е.В., Фатин С.Н., Хорун, Л.В. (2017) *Tulipa biebersteiniana* Schult. Et Schult. Fil. в Центральном Нечерноземье, *Фиторазнообразие Восточной Европы*, т. 11, № 3, с. 113-116.

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

References

Oktyabryova, N.B. (2008) *Tyul'pan Bibershteyna* [Tulipa biebersteiniana], Krasnaya kniga Moskovskoy oblasti [The Red Data Book of Moscow Region], 2nd ed., revised and enlarged, Moscow, Russia, p. 536.

Seregin, A.P. (2001) *Tulipa biebersteiniana* Schult. et Schult. fil. na severnom predele rasprostraneniya [Tulipa biebersteiniana Schult. et Schult. fil. at the northern limit of distribution], *Izucheniye prirody basseyna Oki: tez. dokl. Mezhtregion. nauch.-prakt. konf. «Reka Oka – tret'ye tysyacheletiyе»* [Study of the nature of the Oka basin: report summary. Interregional scientific and practical conference "Oka River - the third millennium"], Kaluga, Russia, pp. 59-61.

Shcherbakov, A.V., Smirnova, E.V., Fatin, S.N., Khorun, L.V. (2017) *Tulipa biebersteiniana* Schult. Et Schult. Fil. v Tsentral'nom Nechernozem'ye [Tulipa biebersteiniana Schult. Et Schult. Fil. in the Central Non-Black Earth Region], *Fitoraznoobrazniye Vostochnoy Yevropy*, vol. 11, no. 3, pp. 113-116.

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

Статья поступила в редакцию (Received): 24.05.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 05.11.2024.

Для цитирования / For citation:

Карпова, Г.А., Захаров, В.П. (2024) Тюльпан Биберштейна в Восточном Подмоскowie, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 3-4, с. 103-106, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-103-106.

Karpova, G.A., Zakharov, V.P. (2024) Bieberstein's Tulip in the Eastern Moscow region, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXV, no. 3-4, pp. 103-106, doi: 10.24412/2782-3237-2024-3-4-103-106.