

ISSN 2782-3237

Экологический мониторинг и моделирование экосистем

Environmental Monitoring
and Ecosystem Modelling

Том XXXV № 1-2

2024



Москва 2024

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

**ENVIRONMENTAL MONITORING
AND ECOSYSTEM MODELLING**

Volume XXXV

№ 1-2

Moscow 2024

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

—КӨЙӨСНҰҢ ГҰКҢҢ ҰӨЦНҰӨГҢҰС
НҰ ҰӨІІНҰГӨСҢЦНҰІ —КӨГҢГҰІҰ
Том XXXV № 1-2 2024 год

Научный редактор: С.Б. Сулова

Выпускающий редактор: В.А. Гинзбург

Технические редакторы:
И.М. Брускина,
Л.В. Кудрявцева

Верстка: Л.А. Прохорова

Фото на обложке:
Б.А. Кухта

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

№ 1-2

Москва 2024

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ

Том XXXV № 1-2 2024 г.

Научный журнал, публикующий статьи о методах и результатах мониторинга загрязнения и состояния окружающей среды, по сопряженным вопросам моделирования. Публикуются также статьи о системах мониторинга и их функционировании, информационные материалы. Издание «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем» выпускается с 1978 г. года. Для экологов, климатологов и специалистов в области охраны окружающей среды.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Романовская А.А. (главный редактор), Брынцев В.А., Гинзбург В.А., Глазунов Ю.Б., Громов С.А., Есеркепова И.Б., Козулин А.В., Кухта А.Е. (зам. главного редактора), Лысенко А.В., Минин А.А., Мокиевский В.О., Назырова Р.И., Ольчев А.В., Папич Л., Разумовский Л.В., Суслова С.Б. (научный редактор), Терехович Т.И., Тихонова И.О., Тишков А.А., Трунов А.А. (ответственный секретарь), Шварц Е.А., Шуйская Е.А.

Все статьи рецензируются.

Адрес для первичного представления материалов для публикации: РФ, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, ИГКЭ, Трунову А.А.; e-mail: pemme@inbox.ru. Правила оформления рукописей и их представления для публикации – см. <http://www.igce.ru/>.

© Оформление издания: ФГБУ «ИГКЭ», 2023

ENVIRONMENTAL MONITORING AND ECOSYSTEM MODELLING

Volume XXXV № 1-2 2024

A scientific journal publishing papers on methodologies and results of monitoring of pollution and state of the environment, as well as on associated modelling issues. Papers on monitoring systems and their functioning, and information materials are also invited. Published since 1978. The journal may be of interest for ecologists, climate scientists and experts in protection of the environment.

EDITORIAL BOARD: Romanovskaya A.A. (editor-in-chief), Bryntsev V.A., Ginzburg V.A., Glazunov Yu.B., Gromov S.A., Yesserkepova I.B., Kozulin A.V., Koukhtha A.E. (deputy editor-in-chief), Lysenko A.V., Minin A.A., Mokievsky V.O., Nazyrova R.I., Olchev A.V., Papic L., Razumovsky L.V., Suslova S.B. (science editor), Terekhovitch T.I., Tikhonova I.O., Tishkov A.A., Trunov A.A. (assistant editor), Shvarts E.A., Shouyskaya E.A.

All papers are subject for peer-reviewing.

Primary submission of manuscripts: Trunov A.A., IGCE, Glebovskaya str, 20B, 107258 Moscow, Russian Federation; e-mail: pemme@inbox.ru. Rules for the preparation and submission of manuscripts are available at <http://www.igce.ru/>.

© Design: FSBI “IGCE” 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

О награждении Анны Анатольевны Романовской	9
К юбилею Вероники Александровны Гинзбург	10

АКТУАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Романовская А.А.

Комментарии к итоговым решениям 28-й Конференции Сторон РКИК ООН (КС28) (30 ноября – 13 декабря 2023 г., ОАЭ, г. Дубай).....	12
---	----

Бардин М.Ю., Антипина У.И., Громов С.А., Липка О.Н., Семенов С.М., Черногаева Г.М.

Итоги Третьей всероссийской научной конференции с международным участием «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества».....	18
---	----

ИССЛЕДОВАНИЯ

Зеленова М.С., Лытов В.М., Гинзбург В.А., Савеленко В.Д., Старостин А.А., Ершов М.А., Лядов А.С., Зайнулин С.М.

Разработка национальных коэффициентов выбросов CO ₂ от сжигания жидких топлив для использования в кадастре парниковых газов Российской Федерации.....	30
--	----

Попов Н.В., Третьяк О.С.

Анализ подходов к разработке коэффициентов выбросов парниковых газов от добычи и подготовки нефти и газового конденсата.....	62
--	----

Аникушин Б.М., Бакурова Э.Ю., Валов С.В., Давлетшина А.Р., Заволокин К.А., Имшенник Е.В., Сосна М.Х.

Разработка уточненных коэффициентов выбросов CO ₂ от производства метанола на предприятиях Российской Федерации.....	73
---	----

Михайлов М.В., Ковешников А.В., Зеленцова Н.И., Илларионова Е.В., Васьков С.Ю.

Динамика коэффициента выбросов диоксида углерода от производств этилена в России в 1990-2022 годы	89
--	----

**Лытов В.М., Трофименко Ю.В., Гинзбург В.А., Якубович А.Н.,
Шелмаков С.В., Деянов Д.А., Шашина Е.В., Зеленова М.С.,
Зайнулин С.М.**

Актуализация оценок выбросов парниковых газов от автомобильного
транспорта в Национальном кадастре за 2010-2021 гг. 101

ОБЗОРЫ

Полумиева П.Д., Трунов А.А.

Анализ возможности уточнения «периодов полураспада»
древесной продукции для оценки запасов углерода
в заготовленных лесоматериалах 124

Полумиева П.Д., Трунов А.А., Коротков В.Н.

Возможности дистанционного зондирования Земли
для оценки изменений в землепользовании..... 140

CONTENTS

FROM THE EDITORIAL BOARD

EVENTS AND COMMEMORATIVE DATES

On the awarding of Anna Anatolievna Romanovskaya.....	9
To the anniversary of Veronika Alexandrovna Ginzburg.....	10

CURRENT MATERIAL

Romanovskaya A.A.

Comments on the final decisions of the 28th Conference of the Parties to the UNFCCCUNFCCC (COP28) (November 30 – December 13, 2023, UAE, Dubai).....	12
--	----

Bardin M.Yu., Antipina U.I., Gromov S.A., Lipka O.N., Semyonov S.M., Chernogaeva G.M.

Results of the Third All-Russian Scientific Conference with international participation "Monitoring of the state and pollution of the environment: surface climate, pollutants and climatically active substances".....	18
---	----

STUDIES

Zelenova M.S., Lytov V.M., Ginzburg V.A., Savelenko V.D., Starostin A.A., Ershov M.A., Lyadov A.S., Zainulin S.M.

Development of country specific CO ₂ emission factors from liquid fuel combustion for the national GHG inventory of the Russian Federation.....	30
--	----

Popov N.V., Tret'yak O.S.

Analysis of approaches to develop greenhouse gas emission factors from oil and gas condensate production and upgrading.....	62
---	----

Anikushin B.M., Bakurova E.Yu., Valov S.V., Davletshina A.R., Zavolokin K.A., Imshennik E.V., Sosna M.H.

Developing of national CO ₂ emission factors from methanol production at the enterprises of the Russian Federation.....	73
--	----

Mikhailov M.V., Koveshnikov A.V., Zelentsova N.I., Illarionova E.V., Vaskov S.Yu.

Dynamics of the carbon dioxide emission factor from ethylene production in Russia in 1990-2022.....	89
---	----

Lytov V.M., Trofimenko Yu.V., Ginzburg V.A., Yakubovich A.N., Shelmakov S.V., Deyanov D.A., Shashina E.V., Zelenova M.S., Zainulin S.M.

Updating estimates of greenhouse gas emissions from road transport in the national inventory for 2010-2021.....	101
---	-----

REVIEWS

Polumieva P.D., Trunov A.A.

Analysis of the possibility of refinement the “half-lives” of wood products to assess carbon stocks in the harvested wood products.....124

Polumieva P.D., Trunov A.A., Korotkov V.N.

The possibility of remote sensing data for the Land use change detection.....140

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2022 г. № 3240-р утвержден важнейший инновационный проект государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Работы в рамках ВИП ГЗ выполняются в шести научных консорциумах, более 40 научно-исследовательских учреждений. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ФГБУ «ИГКЭ»)) является головной организацией по консорциуму 6 и выполняет научно-исследовательскую работу в части осуществления технического перевооружения, цифровизации и актуализации Национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов (Национальный кадастр), совершенствования сбора исходных данных.

ФГБУ «ИГКЭ» является разработчиком ежегодного Национального кадастра Российской Федерации. Оценки выбросов и абсорбции ведутся по секторам экономики с 1990 года и охватывают всю территорию России. Данные Национального кадастра формируются расчетным путем на основании национальной или ведомственной статистической отчетности с использованием конверсионных коэффициентов для пересчета данных о хозяйственной деятельности в величины эмиссии и поглощения парниковых газов.

Методические рекомендации Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) по подготовке Национальных кадастров различают 3 уровня степени методологической сложности расчетов выбросов и поглощений парниковых газов: уровень 1 – это базовый метод, используются коэффициенты по умолчанию из методического руководства МГЭИК,

уровень 2 – промежуточный с использованием национальных коэффициентов,

уровень 3 – наиболее сложный с точки зрения расчетов и потребности в данных, в него входят модельные оценки и результаты измерений.

Национальные кадастры ежегодно проходят процедуру рассмотрения (рецензирования) международными группами экспертов для обеспечения международного признания представленных данных. В замечаниях экспертов по рассмотрению Национального кадастра Российской Федерации отмечена необходимость разработки национальных коэффициентов повышенного уровня сложности (уровни 2 и 3) для ключевых категорий и подкатегорий кадастра (в том числе, по составу топлив, по фугитивным выбросам метана и углекислого газа при добыче, транспортировке и использованию ископаемого топлива, для ключевых категорий в промышленности, сельском хозяйстве и отходах). В связи с этим одной из задач работы консорциума 6 в рамках ВИП ГЗ является разработка новых и уточнение существующих пересчетных коэффициентов, расчетных методик и моделей в результате проведения репрезентативных научных исследований на основе наземных и дистанционных

наблюдений. Применение разработанных и уточненных коэффициентов допускается только после их апробации в соответствии с методологией МГЭИК.

По окончании первого этапа ВИП ГЗ (2024) ожидается разработка 22 коэффициентов и методологий, которые определяют около 30% национальных выбросов в России.

Данный тематический выпуск «ЭММЭ» посвящен апробации разработанных в рамках ВИП ГЗ национальных коэффициентов и методологий оценки выбросов и поглощений парниковых газов.

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ



Главный редактор журнала «Экологический мониторинг и моделирование экосистем» Романовская Анна Анатольевна, директор Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, член-корреспондент Российской академии наук награждена медалью ордена **«За заслуги перед Отечеством»** II степени.

Награда присуждена за большой вклад в развитие отечественной науки, многолетнюю плодотворную деятельность и в связи с 300-летием со дня основания Российской Академии наук (Указ Президента Российской Федерации от 05.02.2024 № 91 «О награждении государственными наградами Российской Федерации»).

Редакционная коллегия поздравляет Анну Анатольевну и желает творческого вдохновения и успехов в многогранной деятельности!

К ЮБИЛЕЮ ГИНЗБУРГ ВЕРОНИКИ АЛЕКСАНДРОВНЫ



Гинзбург Вероника Александровна – заместитель директора, кандидат географических наук, заведующая отделом Исследования процессов стабилизации глобального климата ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля».

Вероника Александровна закончила Московский государственный университет (географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии), Европейские научно-исследовательские курсы по атмосфере (Франция 1995 г.), магистратуру Центрально-Европейского университета (Будапешт, Венгрия, 1998 г.). С 1996 года работает в ФГБУ «ИГКЭ». В 2005 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности «Геоэкология», получила ежегодную премию Росгидромета для молодых ученых имени академика А.Я. Купфера за работы в области мониторинга загрязнения окружающей среды (2005 г.). С декабря 2016 г. назначена заведующей отделом «Исследования процессов стабилизации глобального климата», с августа 2020 года – заместителем директора.

В.А. Гинзбург курирует направление, связанное с инвентаризацией выбросов парниковых газов в секторе «Энергетика» Национального кадастра парниковых газов. Помимо этого она участвует в работах по инвентаризации выбросов, проводимых ФГБУ «ИГКЭ» для регионов и организаций, в подготовке национальной отчетности Российской Федерации, как страны, входящей в приложение I Рамочной Конвенции ООН об изменении климата и в Приложение В Киотского протокола. Вероника Александровна уделяет большое внимание разработке методологий климатических проектов, занимается вопросами, связанными с оценкой потоков парниковых газов и черного углерода, исследованиями в сфере реализации климатических проектов и углерод-

ного регулирования в России. В 2022 г. В.А. Гинзбург принимала участие в разработке концепции, анкеты, методики оценки Российского Рейтинга климатической эффективности (РЭКЭ).

Вероника Александровна активно участвует в переговорных процессах как на межведомственном, так и на национальном и международном уровнях. Она – ответственный координатор Рабочей группы Сети мониторинга кислотных осадков в Юго-Восточной Азии (ЕАНЕТ) и член международного ростера экспертов РКИК ООН по проверке Национальных кадастров выбросов парниковых газов.

Вероника Александровна – высококвалифицированный и разноплановый специалист. Ежегодно ею публикуются статьи в российских и международных научных журналах, периодических обзорах, сборниках трудов российских и международных конференций. Экспертное мнение Гинзбург В.А. авторитетно как в научном, так и в бизнес-сообществе Российской Федерации, отраслевых, государственных организациях, ассоциациях и ведомствах различных уровней, ее приглашают СМИ к обсуждению насущных тем текущей климатической повестки.

Веронику Александровну отличают трудолюбие, отзывчивость, творческая инициатива при решении научных и организационных задач. В ней удивительным образом сочетаются мудрость, профессионализм, талант и интуитивное чутье, тонкое понимание сути задач широчайшего спектра вопросов климатического характера и душевность, понимание, четкость, ясность, сила руководителя.

Сердечно поздравляем Веронику Александровну с юбилеем!

АКТУАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Комментарии к итоговым решениям 28-й Конференции Сторон РКИК ООН (КС28)

30 ноября – 13 декабря 2023 г., г. Дубай, ОАЭ

А.А. Романовская

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

*Адрес для переписки: an_roman@igce.ru

В продолжение уже ставших традиционными комментариев (<https://env-monitoring.ru/index.php/pemme/article/view/44/33> – комментарии к итогам КС27; <http://www.igce.ru/2021/11/мнение-об-итогах-26-й-конференции-сторон/>) представляю анализ решений, принятых на 28-й Конференции Сторон РКИК ООН.

КС28 оставила положительное впечатление и по логистической организации почти ста тысяч участников (обычно в конференциях участвует около 20-30 тысяч), и по обширной программе сайд-эвентов и национальных павильонов (в том числе российского павильона), выставочной части конференции, но, прежде всего, по эффективному управлению переговорным процессом, позволившем закончить конференцию уже в первой половине дня 13 декабря, всего на несколько часов позже запланированного окончания КС. Следует отметить, что это случается крайне редко, стали обычными задержки на одни, двое и даже более суток. За все это следует поблагодарить команду страны-председателя ОАЭ во главе с Султаном бен Ахмед аль-Джабером.

Нестабильная ситуация в мире подчеркивает ценность международных переговоров в рамках РКИК ООН, которая, вероятно, является одной из немногих площадок, где возможны скоординированные решения с участием абсолютно всех стран, где все вместе способны двигаться в направлении общей борьбы с изменением климата.

На КС28 заметно сильно звучали голоса как науки, так и бизнеса. Это объединение следует поддерживать, учитывая, что именно взаимосвязанная система науки – политики – бизнеса способна решать такие комплексные задачи, как борьба с изменением климата. Эту положительную наработку с КС28 следует зафиксировать и далее масштабировать.

Самым важным итогом КС28 является первое глобальное подведение итогов (напомню, что в рамках статьи 14 Парижского соглашения Конференция Сторон периодически подводит итоги осуществления Соглашения для оценки коллективного прогресса в выполнении задачи Соглашения и в достижении его долгосрочных целей). Первое подведение итогов было запланировано на 2023 год, далее они будут повторяться каждые 5 лет. Подразумевается, что результаты глобального подведения итогов должны быть использованы

странами при определении их новых целей – в 2025 году ожидаются новые определенные на национальном уровне вклады (ОНУВ) стран с целями на 2035 год.

Если кратко: глобальное подведение итогов показало, что пока ни по одному из треков, включая митигацию (предотвращение изменения климата), адаптацию и средства осуществления и поддержки, мировое сообщество не находится на траектории, соответствующей задачам и целям Парижского соглашения.

При подведении итогов удалось грамотно учесть последние научные выводы и объективно оценить достигнутые результаты – впервые в решениях КС можно увидеть положительные достижения стран: выполнение уже принятых целей позволит уйти от потепления на 4.0°C до 2.1-2.8°C к концу XXI века. Отмечено в тексте, что при выполнении всех условий по финансированию к 2030 г. общие выбросы должны быть на 5.3% ниже, чем были в 2019 г. Пока только в таком виде, не очень четко, но в решении указано, что пик выбросов, по всей вероятности, будет пройден до 2030 года. Именно этот результат, на мой взгляд, является самым важным достижением мировых усилий стран в борьбе с изменением климата, его переломным моментом. После перелома мир уверенно встанет на низкоуглеродный путь дальнейшего развития и не так важно, когда именно будет достигнута нейтральность по CO₂-потокам или на каком именно значении общего потепления в XXI веке мы остановимся: 1.5 или 1.9 или 2.1°C (напомню, что ограничения роста средней температуры на 1.5-2.0°C установлены политиками и согласованы ими в тексте Парижского соглашения, но они не были обоснованы в результате научных исследований в качестве опасного уровня воздействия на климатическую систему).

Малореалистичная цель в удержании потепления в пределах 1.5°C, которая была навязана на КС26 в Глазго в качестве приоритетной и единственной и которая, по моему мнению, вследствие требований по резкому сокращению выбросов уводит мир в сторону от постепенной перестройки национальных систем в сторону низкоуглеродной экономики, в течение ближайших лет неизбежно исчезнет со стола переговоров. Мне кажется, что тенденция к этому постепенно начинает закладываться – в решениях КС28 цифра в 2.0°C появляется немного чаще, чем ранее. По всей видимости, вокруг 1.5°C довольно скоро разыграются задуманные ранее политические игры, могут «найтись виновные» в невыполнении этой цели. Все это, безусловно, будет очень интересно наблюдать, но мешает миру двигаться в нужном направлении.

Примерно такой же эффект (больше вредный, чем полезный) мог быть и от «метановой инициативы» США и ЕС, принятой в Глазго (сокращение мировых выбросов метана на 30% до 2030 года). В решении КС28 восстановлена грамотная научная основа для этой инициативы – она заняла свое место в рамках снижения выбросов *всех* не-CO₂ парниковых газов (и, только, «в частности, метана»).

Дискуссии в течение последних лет на переговорной площадке перешли от обсуждений целей по общим выбросам парниковых газов к постановке

целей по отдельным источникам выбросов, т.е. от сокращения выбросов к сокращению деятельности (например, на КС27 было согласовано поэтапное сокращение использования угля без систем улавливания). Еще раз подчеркну, что такой подход означает изменение сферы охвата Рамочной Конвенции ООН об изменении климата и Парижского соглашения, где должны обсуждаться сокращения выбросов, а пути их сокращения определяются странами самостоятельно на национальном уровне. (Точнее происходит не «изменение охвата», а его подмена – ведь официально в тексты РКИК ООН и Парижского соглашения никаких изменений не вносятся.)

Однако именно такой подход в ближайшие годы будет масштабироваться и детализироваться. Прецедент КС27 получил продолжение на КС28, в частности, по конкретным мерам в энергетике – принято историческое решение по поэтапному отказу от ископаемого топлива. На следующих конференциях следует ожидать дальнейшей детализации этой цели.

Основные решения КС28 по митигации содержатся в параграфе 28 решения по глобальному подведению итогов <https://unfccc.int/documents/636584>. Среди наиболее интересного можно отметить следующее:

➤ Впервые установлены позитивные цели (не «сократить», а «увеличить»): утроить мощности по возобновляемым источникам энергии во всем мире и удвоить среднегодовые темпы повышения энергоэффективности в мире к 2030 году. Изначально эти цели воспринимались в качестве альтернативы формулировкам по сокращению использования ископаемого топлива в энергетике, а в результате переговоров в тексте остались обе формулировки.

➤ Впервые в тексте КС появилось упоминание атомной энергетики наряду с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), технологиями улавливания и поглощения. Это большое достижение для площадки РКИК ООН. До КС28 любые упоминания атомной энергетики в качестве низкоуглеродной технологии, неоднократно продвигаемые российской делегацией, сопровождались получением антинаград переговоров «ископаемое дня», а из текста они активно вымарывались. В декабре 2023 года после запуска США декларации по утроению атомной энергетики к 2050 году и соответствующей поддержки в выступлении США, в тексте решения КС атомная энергетика появилась. (В качестве иллюстрации, кто на самом деле диктует многие условия и правила на международных переговорах по климату.)

➤ Впервые признается роль низкоуглеродных и переходных видов топлива в достижении углеродно-нейтральных энергетических систем к (около) середине столетия. Включен ли в переходные виды топлива природный газ – пока не ясно. Однако можно с уверенностью утверждать, что природный газ включен в пункт 28d с отказом от ископаемого топлива. По всей видимости, под переходным топливом стоит иметь в виду, прежде всего, низкоуглеродный водород, указанный в пункте 28e.

➤ Осторожно, но в нескольких местах прописана необходимость международной кооперации. В современных условиях, в том числе для нашей страны, это важное условие, которое необходимо повторять в текстах по борьбе с изменением климата.

Впервые установлен Диалог по реализации результатов глобального подведения итогов. Этот диалог начнет свою работу со следующей сессии Конференции Сторон РКИК ООН, будет разработана рабочая программа, которая продлится до 2028 года.

По набору основных решений, принятых в области митигации, можно было бы назвать эту конференцию «прагматичной». Прописаны не только амбициозные цели по отказу от ископаемого топлива, но и предоставлена большая свобода в наборе низкоуглеродных и углерод-нейтральных технологий («ВИЭ, атомная энергетика, технологии улавливания и поглощения, такие как улавливание углерода, использование и хранение, особенно в трудно поддающихся сокращению выбросов секторах, а также низкоуглеродный водород»), предусмотрены переходные пути, сроки трансформации сектора энергетика передвинуты на 2050 год.

Такой прагматичный подход хоть и предполагает менее амбициозное сокращение выбросов парниковых газов, но обеспечит более надежные и последовательные результаты, чем гонка амбиций и обещаний, характерная для предыдущих КС.

На КС28 также определены элементы Рабочей программы по справедливому переходу (выполнение целей Парижского соглашения сопровождается трансформационными перестройками, которые должны учитывать возможные негативные эффекты на общество (потеря мест работы, недостаток энергии и пр.)): в 2024 году будет начата субстантивная работа по этому направлению (проведены диалоги и обсуждения).

В области адаптации

На КС28 запущена Рамочная основа для достижения Глобальной цели по адаптации, определены ее цели и задачи. Впервые установлены конкретные направления по Глобальной цели по адаптации в рамках улучшения благосостояния человечества и качества жизни людей: водная и продовольственная безопасность, здоровье, инфраструктура и поселения, сокращение бедности, сохранение объектов культурного наследия. Следует отметить, что среди этих направлений отсутствует адаптация экономики, которая в российских нормативных документах ставится на первый план среди задач адаптации к изменению климата.

Запущена двухгодичная программа для разработки индикаторов достижения Глобальной цели по адаптации. Индикаторы обсуждали с 2021 г., однако несмотря на все усилия их перечень на КС28 согласовать не удалось.

Впервые установлено, что все страны к 2030 году должны иметь систему оценки климатических рисков и уязвимостей, систему планирования мер по адаптации, системы имплементации и оценки эффективности мер по адаптации. Установлено, что к 2027 г. все страны должны иметь собственные системы раннего предупреждения об опасных явлениях. Последнее решение относится к одним из наиболее существенных решений КС28. Следует ожидать более детального обсуждения этого вопроса на следующих сессиях, пре-

жде всего, с точки зрения направления финансирования на создание и развитие систем раннего предупреждения.

Усиливается фокус на адаптацию на основе экосистем и на природо-ориентированные решения (nature-based solutions), на интеграцию митигации и адаптации в рамках действий в природных экосистемах. В этот раз в тексте полностью учтены особенности всех российских экосистем, в том числе лесов, криосферы, горных территорий, прибрежных и океанических экосистем. Подчеркнута важность трансграничных мер по адаптации. Назревает необходимость раскрытия этих вопросов более подробно на следующих конференциях. Однако в переговорной повестке нет пункта, в рамках которого могли бы быть проработаны вопросы природо-ориентированных решений. Логично было бы включить новый пункт повестки в рамках статьи 5.1 Парижского соглашения и запустить двух- или трехгодичную программу по выработке правил и принципов работы стран в экосистемах и с экосистемами для реализации действий по митигации и адаптации, в том числе трансграничных действий. Отмечу, что статья 5 – единственная статья, по которой работа в рамках Парижского соглашения не ведется с 2015 года.

Принимая во внимание смещение фокуса на секторальные цели, было бы правильно поставить мировые цели и по сокращению площадей природных пожаров – хотя бы в форме декларации. Напомню, что в России уже действует Указ Президента РФ от 15.06.2022 № 382 "О мерах по сокращению площади лесных пожаров в Российской Федерации", предусматривающий сокращение площади лесных пожаров на землях лесного фонда в 2022-2030 гг. не менее чем на 50% относительно уровня 2021 года.

На KC28 продолжена работа по развитию инструментов механизмов статьи 6. В частности, проработаны технические детали электронных реестров, правила их взаимодействия, позволяющие обеспечить качество и прозрачность транзакций.

Климатические проекты согласно правилам статьи 6.4, принятым в Глазго, имеют очень строгие правила. В 2023-2024 гг. эти правила необходимо представить в виде набора конкретных методологий. Эта работа идет, но полностью не закончена. Очередной драфт по разработке рекомендаций к требованиям для методологий, а также рекомендаций к правилам проектов по поглощению/удалению (removals), которые включают выполнение проектов в природных экосистемах, были разработаны Надзорным органом по статье 6.4 (FCCC/PA/CMA/2023/15/Add.1). В частности, разработаны определения по поглощению (удалению) парниковых газов из атмосферы в результате антропогенной деятельности, которые включают их уничтожение или долгое хранение. Предложено создание буферного пула единиц AR6.4 в качестве страховки от риска непостоянства, а также предусмотрена возможность прямой отмены выписанных единиц для компенсации этого риска (в случае, если оценка риска свидетельствует о незначительных рисках проекта). При этом буферные единицы могут быть использованы только для покрытия тех явлений непостоянства, которые были неизбежны. Если явления будут признаны управляемыми, то потери должны быть компенсированы за счет самого про-

екта, а не буферного пула. Более детальное руководство будет разработано к КС29.

Как и в прошлом году, этот драфт рекомендаций Надзорного органа по статье 6.4 был подвергнут критике, особенно с точки зрения необходимости ужесточения подходов к минимизации рисков непостоянства и утечек, усиления консерватизма базовых линий, отсутствию негативных экологических и социальных побочных эффектов проектов. Однако драфт был принят КС28 в качестве основы для дальнейшей работы в течение 2024 года.

В области финансов

Потребности развивающихся стран в финансировании адаптации оцениваются на уровне \$215-387 млрд ежегодно до 2030 г., около \$4.3 трлн в год необходимо инвестировать в чистую энергетику до 2030 г., а затем увеличить их до \$5 трлн в год до 2050 г., чтобы достичь нулевых выбросов к 2050 году.

В конце 2023 г. развитые страны смогли продемонстрировать прогресс по общей сумме направленного финансирования в развивающиеся страны, но установленная ранее цель (100 млрд долларов в год) пока так и не достигнута. В 2024 г. необходимо установить новую количественную цель по финансам в рамках Парижского соглашения. Работа в 2024 г. пройдет снова в формате специальной программы, семинаров и технических диалогов с участием министерского уровня перед следующей КС. На КС28 согласовали призыв к развитым странам подготовить доклад об удвоении коллективного климатического финансирования для адаптации развивающимся странам, с уровня 2019 г. к 2025 г. в контексте достижения баланса между смягчением последствий и адаптацией.

Значимым решением КС28 является установление специального Фонда потери и ущерба, принято решение об его управлении Советом (26 членов) и поддержке отдельным секретариатом. Утвержден Руководящий документ Фонда, его задачи, сфера охвата и процедуры. Началось наполнение фонда. В частности, в выступлении главы российской делегации советника Президента по климату Р.С.-Х. Эдельгериева на высоком сегменте КС28 было заявлено, что «Россия рассматривает вопрос о добровольном выделении финансового вклада в Фонд по потерям и ущербу за счёт замороженных национальных золотовалютных резервов в международных организациях».

**Третья всероссийская научная конференция
с международным участием
«Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды:
приземный климат, загрязняющие и климатически
активные вещества»**

М.Ю. Бардин, У.И. Антипина, С.А. Громов, О.Н. Липка,
С.М. Семенов, Г.М. Черногаева*

Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля,
РФ, Москва, 107258, ул. Глебовская, д. 29Б,

*адрес для переписки: *olipka@mail.ru*

15-17 ноября 2023 г. Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля (ФГБУ «ИГКЭ») провел Третью всероссийскую научную конференцию с международным участием «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества». С приветственным словом обратились к участникам заместитель руководителя Росгидромета В.В. Соколов и директор ФГБУ «ИГКЭ», чл.-корр. РАН А.А. Романовская.

Конференция, посвященная проблемам загрязнения окружающей среды, климатическим изменениям и последствиям этих воздействий вызвала значительный интерес. Среди докладчиков были ученые, специалисты из НИУ Росгидромета, Российской академии наук и Университетов, что говорит о важности исследования рассматриваемых проблем, вовлеченности в этот процесс ведущих научных коллективов России. То, что подобное мероприятие проходило в ИГКЭ, одном из ведущих НИУ Росгидромета, подчеркивает традиционное внимание Росгидромета к этой проблематике и его лидерство по многим направлениям.

Ученым из разных коллективов очень важно было «сверить часы» и объективно оценить на каком этапе находятся их исследования, является ли достаточно полным их охват проводимыми в стране научными программами, соответствует ли научно-методический уровень исследований современному международному уровню. Конференция в значительной мере помогла прояснить эти вопросы.

Пленарное заседание конференции прошло 15 ноября. Модератор – д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Семенов С.М.

16 и 17 ноября проводились секционные заседания:

Атмосфера, модератор – к.г.н. Громов С.А.;

Водные объекты, модератор – д.г.н., профессор Черногаева Г.М.;

Наземные экосистемы, модератор – к.г.н. Липка О.Н.;

Приземный климат, модератор – к.ф.-м.н. Бардин М.Ю.

Краткие итоги пленарного и секционных заседаний приводятся ниже.

Общее заключение пленарного заседания

На пленарном заседании конференции был рассмотрен комплекс вопросов, относящихся к проблеме мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды и антропогенного обогащения атмосферы климатически активными веществами – парниковыми газами (ПГ) и аэрозолями.

В докладах, прозвучавших на заседании, были представлены результаты работы системы мониторинга климата, функционирующей в России под эгидой Росгидромета; перспективы создания сети мониторинга выбросов черного углерода и ее роль в оценке влияния этих аэрозолей на климат; концепция единой системы мониторинга климатически активных веществ в нашей стране; общая концепция мониторинга загрязнения атмосферы и его роль в деятельности по управлению качеством воздуха на национальном и региональном уровнях. Была также показана историческая ретроспектива и особенности формирования национальных сетей наблюдений за качеством окружающей среды в нашей стране. Было указано на существование проблемы, требующей решения – отсутствие согласия в подходах между сетевыми наблюдателями и разработчиками стандартов.

На заседании был заслушан доклад, в котором была представлена общая картина потоков ПГ на территории России и даны оценки их балансов; указаны основные вектора дальнейшего развития этого направления и имеющиеся проблемы.

Большое внимание было уделено рассмотрению результатов методических исследований, в том числе были показаны последствия пересмотра значений потенциалов глобального потепления и его влияние на оценки выбросов ПГ в России; указано на необходимость предварительной корректировки данных гидрологического мониторинга при их практическом использовании.

Были представлены и региональные исследования – оценены современные и будущие изменения климатических характеристик и их экологические последствия для территории Ленинградской области; изложены результаты многолетнего мониторинга и оценки влияния лесных пожаров и антропогенных источников загрязнения на качество атмосферного воздуха региона оз. Байкал; указано на необходимость мониторинга грозовой активности, особенно сухих гроз, состояния зон затопления и подтопления для этого региона; проанализировано влияние процессов внутреннего водообмена на распространение загрязняющих веществ в многолопастном водохранилище на примере Вазузского вдхр.; показаны результаты сравнительных экспериментов по измерению разложения растительного опада почвенной микробиотой, проводимых в 2013-2020 гг., в Приокско-Террасном биосферном заповеднике и в природно-историческом парке «Кузьминки-Люблино» г. Москвы.

Общее заключение секции «Атмосфера»

Доклады секции «Атмосфера» были посвящены работам трех направлений: улучшение качества оценки и отчетности о национальных выбросах пар-

никовых газов, исследования особенностей загрязнения воздуха в городах и результаты мониторинга содержания загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосфере на региональном уровне.

В ходе расчетов и инвентаризации выбросов ПГ были отмечены отклонения национальных коэффициентов от значений, предлагаемых по умолчанию в Руководствах МГЭИК, в том числе из-за низких величин базовых коэффициентов для жидкого топлива и устаревших данных. Это можно улучшить путем организации научно-исследовательских работ по изучению компонентного состава приоритетных видов жидкого топлива в рамках ВИП ГЗ по данному направлению, с последующим обсуждением на Целевой группе по национальным инвентаризациям парниковых газов (TFI).

Также были отражены проблемы учета выбросов ПГ от автомобильного и внедорожного транспорта из-за отсутствия требуемой детализации согласованных технологических и статистических данных. Отмечена необходимость преобразования в единый массив получаемых разными способами и из разных источников доступных данных о структуре парка транспортных средств и среднегодовых пробегах путем объединения всей информации в едином хранилище, а также использования единых методик при расчете выбросов.

Результаты разработки коэффициентов выбросов CO_2 от производств метанола на базе оценки баланса углерода для технологий на предприятиях РФ позволили получить национальные коэффициенты выбросов при производстве метанола, а также рассмотреть их динамику за более чем 25-летний период с учетом значений для отдельных предприятий.

Результаты расчетов выбросов метана от стационарных источников сжигания топлива в России показали, что в абсолютных величинах максимальные выбросы наблюдаются на территориях Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов, хотя наибольшая плотность выбросов на единицу площади приходится на территории субъектов в Европейской части РФ.

По подготовленным оценкам баланса ПГ в управляемых экосистемах России рассмотрен потенциал направления работ по уточнению компонентов, поглощающих CO_2 , применительно к лесам, возделываемым землям, сенокосам и пастбищам, водно-болотным угодьям, поселениям и заготовленным лесоматериалам. Прогнозируется, что нетто-поглощение управляемыми экосистемами (прежде всего – лесами) увеличится в связи с уточнением исходных данных для расчетов и пересчетных коэффициентов.

Были рассмотрены вопросы уточнения выбросов ПГ, возникающих в животноводстве, как путем использования детальной статистики в этой отрасли сельскохозяйственного производства, так и с использованием измерений в модельных установках для оценки эмиссии ПГ от хранения навоза.

Проведенные оценки условий увлажнения урбанизированных территорий России были также направлены на получение оценок нерегулируемых выбросов метана при захоронении отходов.

В работах по исследованию и мониторингу загрязнения воздуха городов были представлены оценки особенностей элементного состава приземного аэрозоля в Москве. Для мониторинга и реализации мер по предотвращению

экстремального аэрозольного загрязнения атмосферы города из-за локальных источников (строительные и ремонтные работы) целесообразно учитывать плотность расположения таких источников, длительность работ и специфические условия города для рассеивания и накопления загрязнения.

Результаты исследований уровней загрязнения промышленных городов полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) с использованием индикаторных соотношений и корреляционных связей между компонентами ПАУ и метеорологическими параметрами, показали, что в существующем годовом ходе концентраций в холодный период наблюдается увеличение доли ПАУ пирогенного происхождения из-за роста потребления органического топлива.

Усиление загрязнения воздуха в городах южной Сибири при ухудшении условий рассеивания в зимний период может проявляться в росте концентраций основных ионов в осадках на их территории, отражая влияние значительных выбросов в атмосферу, особенно в Забайкальском крае, где около половины промышленного потенциала субъекта федерации сосредоточено в краевом центре – г. Чита.

Среди методов и способов измерений состава примесей региональной и глобальной атмосферы были представлены разработки баллонного аэрозольного зонда обратного рассеяния для мониторинга изменений в аэрозольном составе атмосферы до высоты в 30 км, использование методов измерений сажи в атмосферных пробах для исследований климатических факторов, создание вспомогательных устройств для аналитических работ.

В докладе по вопросам сопоставимости данных наблюдений за концентрациями ПГ отмечено хорошее соответствие результатов наблюдений российского НИУ на станции «Тикси» данным измерений исследователей других стран и требованиям программы ВМО «Глобальная служба атмосферы».

В серии работ по исследованию регионального загрязнения атмосферы приведены: результаты идентификации природных и антропогенных групп источников в регионе озера Байкал, оказывающих влияние на химический состав атмосферных выпадений на станциях «Листвянка» и «Байкальская»; результаты использования разных статистических показателей для анализа тенденций изменений концентраций ЗВ в атмосферном воздухе фоновых районов для станций комплексного фонового мониторинга; оценка уровней загрязнения атмосферы тяжелыми металлами на ООПТ запада Европейской части России, показавшая, что их содержание формируется поступлением из природных источников и за счет дальнего атмосферного переноса; современные требования к мониторингу содержания ЗВ в атмосферном воздухе с учетом опыта и рекомендаций международных программ и направлений использования получаемой информации.

Возможности моделирования и использования его результатов были продемонстрированы в представлении предварительных модельных оценок концентраций чёрного углерода в воздухе, потоков его выпадений и трансграничных потоков для территории России, с использованием обработанной информации о выбросах чёрного углерода в России и других странах

за период с 2010 по 2021 год. Также были представлены материалы возможных обобщений и их представления для информационной продукции Росгидромета на базе использования результатов ежегодного моделирования атмосферного загрязнения и выпадений веществ, входящих в программы мониторинга и исследований ЕМЕП.

Результаты исследований по использованию снежного покрова при определении распространения атмосферного загрязнения, представленные для ртути (в городах) и микропластиков (на территории слабо урбанизированного района), показали, что при перспективности этих работ возможности для получения количественных оценок все еще недостаточны.

Общее заключение секции «Водные объекты»

На секции «Водные объекты» были представлены доклады авторских коллективов из 21 научной организации Российской Федерации и сопредельных государств, в которых были рассмотрены проблемы состояния водных экосистем, качества морских и пресных вод под воздействием меняющегося климата и загрязнения природных сред.

Организации авторов докладов секции: Федеральные государственные бюджетные учреждения науки: Институт географии РАН, Институт водных проблем РАН, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Лимнологический институт СО РАН, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Байкальский институт природопользования СО РАН, Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, ФГБУ «ИГКЭ», ФГБУ «ГХИ», ФГБУ «ГОИН», ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», ФГБУ «НПО «Тайфун», Вологодский филиал ФГБНУ «ВНИРО», ГБУ «Северное УГМС», Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Тюменский государственный университет, Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий ЮФУ, Центр исследования микропластика в окружающей среде Биологического института Томского государственного университета, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Ереванский государственный университет (Армения).

На секцию было представлено 32 доклада, посвященные современному состоянию, планам и проектам эффективного воздействия на улучшение состояния водных ресурсов и их качества в Российской Федерации и сопредельных государствах. Диапазон рассмотренных проблем в докладах был очень широк: изменение и влияние на качество гидрологического режима крупных рек, анализ и оценка радиоэкологической обстановки арктических морей, оценка состояния пресноводных и морских экосистем Арктической зоны, а также озера Байкал и его бассейна. Кроме того, на секции были подняты актуальные современные проблемы, такие как оценка эмиссии метана с поверхности водохранилищ, загрязнение водных объектов пластиком и его накопление в рыбных организмах.

При подведении итогов работы секции «Водные объекты» была отмечена своевременность и актуальность проведения Третьей всероссийской научной

конференции с международным участием «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества», в том числе самой секции.

Выводы, сделанные докладчиками, могут послужить процессу улучшения состояния пресноводных и морских экосистем в Российской Федерации и за ее пределами.

Общее заключение секции «Наземные экосистемы»

В ходе работы секции было представлено 22 доклада, широко охватывающих тему мониторинга наземных экосистем и их загрязнения, а также воздействия последствий изменений климата на динамику эмиссии парниковых газов.

В докладах собраны ценные факты о региональной специфике динамики экосистем. На территории заповедника «Утриш» идет успешное восстановление растительности после пожаров в 2009 и 2020 гг., а также чрезмерной туристической нагрузки. Ведется мониторинг общего состояния биологического разнообразия и его изменений как для наземной, так и для прибрежной подводной части. Предлагается использование наземных радаров для получения данных о динамике прибрежных экосистем, течений, волновой активности и других процессов.

Использование цифровых моделей рельефа, построенных по данным воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки разных лет, позволило проследить динамику рельефа эоловых форм Анапской пересыпи. За шесть лет в ее северо-западной части сформировалась новая крупная прислоненная дюна, и начался эоловый транспорт песка на поверхность возвышенного коренного берега.

Предложен новый подход к оценке экосистемных услуг постпирогенных лесных почв. В качестве параметра количественной оценки использовали комплексный показатель оценки экологического состояния почв (Р_е). Он может служить как индикатором деградации отдельного свойства почвы, так и использоваться при экономической оценке отдельных экологических услуг городских лесов.

На основе накопленных данных мониторинга предлагается способ восстановления зональных экосистем на месте угольных отвалов через естественное и искусственное лесовосстановление (без затрат на выравнивание горных отвалов и нанесение плодородного слоя). Когда оно проходит успешно – исключается эрозия, повышается продуктивность отвалов, формируется собственный горизонт почвы и запускается естественный сукцессионный процесс.

Приводятся материалы, доказывающие эффективность и ограничения использования дистанционных методов на примере антропогенного воздействия на компоненты экосистем водохранилищ ГЭС и деятельности полигонов по утилизации боеприпасов. Микроклиматическое воздействие водохранилищ проявляется в увеличении и изменении направления прироста

древесины. При подрыве взрывчатых веществ на грунте образуется три зоны воздействия ударной волны: сжатия, разрушения и сотрясения грунта. Предлагается оценивать воздействие не по линии воронки, а по зонам.

Отмечается перспективность развития пилотных типовых моделей эффективного развития ООПТ (природных лабораторий) с высокой концентрацией научно-инновационного, методического потенциала в области охраны окружающей среды. В целях реализации государственной политики в сфере охраны окружающей среды на базе пилотных моделей ООПТ предлагается создать специализированную инфраструктуру по комплексным исследованиям, включающую мониторинговую сеть, оснащенную стационарными устройствами, сеть маршрутов и площадок постоянных наблюдений, оснащение профильных лабораторий, полевых стационаров оборудованием для проведения полевых работ, благоустроенных помещений для участников научных и образовательных программ.

Минимизации негативного воздействия изменений климата на туризм приморских территорий Европейской части России представляется возможным достичь за счет применения современных технологий (как при строительстве, так и при эксплуатации инженерных сооружений, относящихся к туристической инфраструктуре, или активно используемых туристами), развития новых видов туризма и перераспределения туристического потока в пространстве и времени.

Анализ наземных и спутниковых наблюдений подтверждает, что за последние 40 лет на фоне постоянного повышения глобальной температуры, в Арктическом бассейне происходят заметные изменения видового состава и общей продуктивности тундровых биомов. По палеоботаническим данным максимальные температуры воздуха были зафиксированы на островах Арктического бассейна, что обеспечило произрастание березы высокоствольной до 75° с.ш. Другое региональное проявление изменений климата связано с динамикой периодов высокой пожароопасности.

Накоплены факты об антропогенном и естественном загрязнении ландшафтов и их компонентов. Предложено техническое решение, которое позволяет корректно идентифицировать по данным мониторинга источник и время загрязнения почвы, воды, крови и/или грудного молока стойким хлорорганическим пестицидом ДДТ в регионах Крайнего Севера. В результате анализа слабого (300-700 Бк/м³) и сильного (6000-8000 Бк/м³) воздействия радона сделано предположение, что малые дозы радиации могут увеличивать энергию роста и CO₂-газообмен у сосны.

Получен большой объем экспериментальных данных по мониторингу стойких органических загрязнителей (СОЗ) уникальной экологической системы озера Байкал. С использованием современных хромато-масс-спектрометрических методов анализа установлены фактически сложившиеся на момент исследований (2021-2022 гг.) уровни загрязнения природных сред (атмосферный воздух, вода, донные отложения, почва) в районе г. Байкальска; получена информация о широком спектре стойких органических загрязнителей, включённых в приложения Стокгольмской конвенции о СОЗ.

В ходе исследования уровней содержания токсичных загрязняющих веществ (СОЗ, ПАУ) в окружающей среде оз. Байкал было установлено, что при положительных температурах (апрель-октябрь) средняя концентрация Σ ПХБ больше в 3.6 и Σ ДДТ в 4.7 раза по сравнению с холодным периодом (ноябрь-март, отрицательные температуры). Сезонное распределение полихлорированных бифенилов (ПХБ) в системе атмосферный воздух – почва на территории г. Байкальска показало, что для всех конгенеров ПХБ в течение года преобладает испарение с поверхности земли (63.5 % от общего числа проб), тенденция к осаждению ПХБ из атмосферы наблюдалась в 9.9 % случаев, в 26.6 % случаев ПХБ находились в состоянии равновесия.

Предлагается модель для описания изменений в экосистеме под воздействием точечного источника поллютантов в зависимости от локальной концентрации поллютантов и продолжительность их воздействия, верифицированная по данным о состоянии лесных лиственных экосистем вблизи ГМК «Норильский никель» с 1930 г. На примере Черногорского ООО ГОК вблизи г. Норильска обсуждаются трудности мониторинга и оценки воздействия на окружающую среду в случае, когда расположение проектируемого недродобывающего производства находится в зоне воздействия прежде действующего предприятия и уже имеется накопленный ущерб природным системам.

На основе регрессионных зависимостей между уровнем техногенного загрязнения и индексами, характеризующими состояние ассимилирующей фитомассы древостоя лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) в радиусе 100 км от Братского алюминиевого завода и эффективность их антиоксидантной системы, разработана диагностическая шкала, позволяющая ранжировать древостой по степени снижения жизненного состояния на загрязняемых территориях. Данная шкала позволяет выявлять изменения в состоянии древостоев на самых ранних стадиях, зачастую до появления внешних признаков ослабления.

Рассматривается метод оценки состояния растительности для территорий с распределенными источниками поллютантов по дистанционным характеристикам отклика значений фотосинтетического индекса NDVI в течение года в ответ на изменения величин температуры подстилающей поверхности LST.

Оценка изменения содержания тяжелых металлов в различных компонентах природной среды на территории Приокско-Террасного природного биосферного заповедника демонстрирует тренд на снижение поступления свинца с осадками и снижение концентраций кадмия в атмосферном воздухе, а также снижение концентраций этих металлов в поверхностных водах, что может свидетельствовать о снижении антропогенной нагрузки на исследуемую территорию.

Подчеркивается важная роль заповедников при фоновой оценке и мониторинге естественной динамики ландшафтов, погодной амплитуды их состояния, на которые затем накладывается техногенное воздействие. Введение новых модных систем оценок и мониторинга (эконет, карбоновые полигоны, % ООПТ) отвлекает от уже сложившейся системы, понижает ее значимость,

снижает финансирование. Они могут быть эффективны, но в пределах разумного и учитывая национальный интерес и сложившуюся систему мониторинга.

Мониторинг ПГ в природных системах стал в последние годы приоритетной темой научных исследований. Разработана процессно-ориентированная модель образования и эмиссии ПГ, описывающая зависимость эмиссии метана от уровня болотных вод. В основе расчета эмиссии метана лежит уравнение баланса массы в вертикальном столбе единичного сечения почвы, слоя наземной растительности и слоя воды над поверхностью почвы.

Изучается способность ледниковых органоминеральных отложений (криоконитов) аккумулировать углерод органических соединений и некоторые тяжелые металлы. В криоконитах южного склона г. Эльбрус были обнаружены высокие значения потенциально-минерализуемого углерода и базального дыхания, что указывает на высокую микробиологическую активность и возможность быстрого вовлечения углерода в биогеохимические циклы, что может привести к ускорению развития первичных почв и почвоподобных тел на местах отступления ледника, а также к изменению углеродного цикла в горных экосистемах.

Анализ данных по потокам ПГ из базы сети FLUXNET, включающих результаты измерений потоков скрытого тепла (LE) и потоков CO₂ (NEE) для 17 мониторинговых станций в лесах тропических широт и 26 – в лесах умеренных широт показал, что периоды сильной жары могут быть наиболее важными факторами, влияющими на баланс CO₂ и H₂O в лесах умеренного пояса. В средних широтах экстремальные температуры и осадки оказывают сопоставимое воздействие на потоки NEE и LE, в отличие от тропиков, где преобладает влияние осадков на потоки.

Уточнение оценок запасов углерода в полуобработанной продукции из древесины, которая заготавливается в Российской Федерации, подтвердило, что национальные периоды полураспада заготовленных лесоматериалов по предварительным оценкам имеют показатели на 1-2 порядка выше, чем предложенные для расчетов в Руководящих принципах МГЭИК.

Представлены возможности и практическая ценность результатов мониторинга на примере базы данных «Чернобыль», в которой накопленная информация о радиоактивном загрязнении позволяет с высокой степенью точности рассчитывать прогностические оценки изменения среднего уровня загрязнения ¹³⁷Cs населенных пунктов, определять сроки их перехода в другие льготно-экономические зоны, также для некоторых населенных пунктов может наблюдаться нестандартное изменение среднего уровня загрязнения ¹³⁷Cs.

Конкретные предложения в Резолюции Конференции поступили от НПО «Тайфун»: рекомендовать продолжить выполнение работ по высокотехнологичному мониторингу CO₂ уникальной экологической системы оз. Байкал с использованием современных хромато-масс-спектрометрических методов анализа, имея ввиду проведение 10-летнего цикла наблюдений за период 2021-2030 гг. Результаты этой работы позволят найти статистически достоверные тренды изменения концентраций CO₂ в условиях глобальных клима-

тических изменений и внесут весомый вклад в охрану окружающей среды объекта всемирного природного наследия озера Байкал и в обеспечение выполнения Российской Федерацией обязательств по Стокгольмской конвенции о СОЗ.

Общее заключение секции «Приземный климат»

На заседании секции было представлено 13 докладов, охватывающих довольно широкий круг вопросов, связанных с мониторингом и исследованием изменчивости климата по эмпирическим данным.

Центральной темой работы секции стал анализ изменчивости ряда климатических параметров, текущие аномалии и тенденции изменения которых включаются (или предлагаются для включения) в ежегодный «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации» и/или бюллетени и обзоры, размещаемые на сайтах ответственных институтов. В докладе, посвященном глобальным аспектам долгопериодных изменений температуры у поверхности земного шара, был представлен подробный анализ изменений приповерхностной температуры с 1850 г. для различных пространственных (земной шар и полушария, континенты, северные части Тихого океана и Атлантики) территорий и временных (рассматривались тренды по скользящим периодам длиной 30, 50, 70 лет) рядов. Показано, что в последние десятилетия наблюдается согласованный рост площади, занятой экстремально высокими температурами, и убывание площади под низкими температурами (ниже «нормы» и экстремальными).

Также была представлена региональная характеристика изменчивости показателей экстремальности температурного режима, показавшая, в частности, рост сезонной продолжительности волн тепла для широтных зон ЕЧР. Была проанализирована связь изменений этого показателя с режимами региональной циркуляции атмосферы. Во всех зонах изменения значимо связаны с модой Восточная Атлантика – Западная Россия, в отрицательной фазе которой резко возрастает антициклоническая блокирующая активность над ЕЧР и, соответственно, рост летней продолжительности волн тепла. Поскольку отрицательная фаза ВАЗР наблюдается при теплой Северной Атлантике, глобальное потепление будет вызывать дополнительный рост дней с волнами тепла летом в ЕЧР, и, соответственно, рост засушливости и опасности лесных пожаров.

Сотрудниками ВНИИГМИ-МЦД был представлен ряд докладов, посвященных новому элементу мониторинга – гололедно-изморозевым отложениям, имеющему важное практическое значение (прежде всего, для линий электропередачи, а также лесоводства, сельского хозяйства и других отраслей); исследованию вертикальной структуры трендов аэрологических величин для месяцев, сезонов, года в целом для земного шара, Северного и Южного полушарий в разных атмосферных слоях за период радиозондовых наблюдений 1964-2018 гг.; исследованию изменений характеристик облачности, являющейся одним из важнейших регуляторов приходящей на поверхность солнечной радиации. Собранный массив данных наблюдений за

облачностью на гидрометеорологических станциях Росгидромета позволил получить численные оценки изменений облачности разных типов и показал возможность создания технологии мониторинга облачности в ближайшей перспективе.

Также были представлены общая схема мониторинга аэрологических данных, полученных с более чем 900 станций и обобщённый анализ среднегодовых и сезонных аномалий и трендов температурного и ветрового режима в Северном полушарии за 2015-2022 гг.; результаты ежемесячного мониторинга циклонической активности на европейской территории России, проводимого по некоторым ее характеристикам, размещаемых на портале ЕСИМО.

Наряду с анализом трендов влагозапаса снежного покрова на территории РФ – важнейшей составляющей гидрологического цикла суши, были рассмотрены предложения по дистанционным авиационным и беспилотным методам определения влагозапаса в снежном покрове с помощью гамма-съёмки, потенциально позволяющим охватить значительные территории, слабо освещённые контактными наблюдениями.

Развернутая эмпирико-статистическая характеристика изменений климата предгорной зоны Северного Кавказа была представлена исходя из анализа изменений летних атмосферных осадков и температуры воздуха в г. Нальчике.

Оценка трендов экстремальных скоростей ветра в Российской Арктике за период 1980-2016 была проведена на основе данных реанализа высокого разрешения, полученных с использованием версии региональной негидростатической модели для региона, включающего арктические моря Северной Атлантики, Баренцево, Карское и море Лаптевых и сушу в соответствующем секторе, а также данных 90 гидрометеорологических станций российского севера. По станционным данным обнаружено значимое уменьшение экстремальных скоростей ветра на западе региона (до Обской Губы).

На секции были заслушаны доклады об исследовании изменения однородности режима осадков на территории РФ с использованием моделирования с помощью цепей Маркова 1-го порядка; о природе суточных вариаций городского острова тепла г. Екатеринбурга, где был рассмотрен механизм сдвига суточного цикла интенсивности городского острова тепла, т. е. разности температуры в городе и окрестностях.

Оценка последствий изменения климата для природных и хозяйственных систем была дана на основе математического моделирования климатических ареалов биологических видов.

С методической точки зрения была рассмотрена тема скачкообразных изменений климата. Было показано, что при автокоррелированности климатических временных рядов и/или при наличии трендов применение т.н. «метода расширяющегося окна» приводит к систематическому «обнаружению» фиктивных моментов «ступенчатых» изменений климата.

В целом следует отметить высокое качество представленных докладов. Изложенные результаты важны с научной точки зрения как вклад в характеристику и, частично, понимание факторов и механизмов региональной климатической изменчивости; с практической для развития системы мониторинга

климата РФ; с методической – чтобы избежать ошибок анализа при неправильном применении тех или иных математических методов или ошибочной интерпретации результатов.

Выводы

Участники отметили, что все представленные направления успешно развиваются усилиями коллективов ученых из НИУ Росгидромета и РАН, университетов, природоохранных учреждений. Развитие государственных систем мониторинга климата, расчетного мониторинга выбросов и абсорбции парниковых газов, мониторинга загрязнения окружающей среды происходит под руководством Росгидромета. Использование этими системами возможностей ООПТ, что предполагалось исходными концепциями фонового мониторинга, пока является недостаточным.

Участники выразили благодарность организатору конференции – Институту глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля – за организацию мероприятия и своевременную возможность обменяться информацией о состоянии и новых достижениях в сфере научных направлений по тематике конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества», об имеющихся проблемах и путях их решения.

В настоящее время материалы Конференции размещены на сайте (<http://conf.igse.ru/>) и доступны для ознакомления всем желающим.

Разработка национальных коэффициентов выбросов CO₂ от сжигания жидких топлив для использования в кадастре парниковых газов Российской Федерации

*М.С. Зеленова¹⁾, В.М. Лытов^{1,2)}, В.А. Гинзбург¹⁾, В.Д. Савеленко^{3,4)},
А.А. Старостин^{3,4)}, М.А. Ершов^{3,4)}, А.С. Лядов⁵⁾, С.М. Зайнулин^{1,4)}*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107058, Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾ ФГБОУ ВО «Московский Автомобильно-Дорожный Государственный Технический Университет (МАДИ)»,
Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64

³⁾ ООО «Центр Мониторинга Новых Технологий»,
Россия, 121205, Москва, тер Инновационного Центра Сколково, Большой б-р, 42 стр. 1

⁴⁾ ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65 кор.1

⁵⁾ Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН,
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 29

*Адрес для переписки: mszelenova@igce.ru

Реферат. В работе представлены проблематика, современное состояние, концепция и особенности подхода к выполнению научно-исследовательской работы по разработке национальных коэффициентов выбросов и изучению компонентного состава приоритетных видов жидких топлив, производимых на нефтеперерабатывающих заводах Российской Федерации. Примененный подход к разработке коэффициентов выбросов от сжигания жидких топлив является инновационным и ранее не применялся для выполнения подобных задач на национальном уровне. Основное исследование выполнено аналитическим способом с помощью разработанной расчетной модели предсказания компонентного состава. Дополнительно проанализировано 62 образца жидких видов топлива, используемых для корректировки расчетной модели. Практически для всех топлив во временном ряду замечена тенденция к снижению содержания углерода и расчетных коэффициентов выбросов, итоговая неопределенность которых менее 1%. Результат оценки расчетных и экспериментальных данных показал, что небольшое расхождение между ними не выходит за пределы интервала неопределенности. В национальном масштабе сходимости модели определена на уровне не более 1-2%. Внедрение новых коэффициентов выбросов приведет к увеличению чувствительности Нацио-

нального кадастра от изменения экологического класса и состава используемых в России топлив, а также к увеличению дельты сокращения выбросов в последние годы по сравнению с 1990 годом.

Ключевые слова. Углекислый газ, жидкое топливо, выбросы, содержание углерода, коэффициент выбросов, сжигание топлива, теплота сгорания.

Development of country specific CO₂ emission factors from liquid fuel combustion for the national GHG inventory of the Russian Federation

*M.S. Zelenova¹⁾, V.M. Lytov^{1,2)}, V.A. Ginzburg¹⁾, V.D. Savelenko^{3,4)},
A.A. Starostin^{3,4)}, M.A. Ershov^{3,4)}, A.S. Lyadov⁵⁾, S.M. Zainulin^{1,4)}*

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

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

³⁾ Ltd. «New Technologies Watch Center»,
42/1, Bolshoy Blvd., Innovation Center Skolkovo, Moscow, 121205, Russian Federation

⁴⁾ National University of Oil and Gas «Gubkin University»,
65/1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation

⁵⁾ A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences,
29, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation

*Correspondence address: mszelenova@igce.ru

Abstract. The paper presents the problematics, current state and approaches to the implementation of research work to study the component composition of priority liquid fuels produced at oil refineries of the Russian Federation. The applied approach to the development of emission factors for selected liquid fuels is innovative and has not been used before to perform similar tasks at the national level. The main study was carried out analytically using the developed prediction model for component composition. In addition, 62 samples of liquid fuels were analyzed and the calculation model was adjusted. For almost all fuels in the time series, a decreasing trend in carbon content and calculated emission factors was observed, the final uncertainty of which is less than 1%. The result of the evaluation of calculated and experimental data showed that the small discrepancy between them does not exceed the uncertainty interval. On the national scale, the convergence of the model is determined at the level of not more than 1-2%. The introduction of new emission factors leads to an increase in the sensitivity of the National Inventory to changes in the environmental class and composition of fuels used in Russia, as well as to an increase in the reduction of emissions in recent years in comparison with 1990.

Keywords. Carbon dioxide, liquid fuels, emissions, carbon content, emission factor, fuel combustion, calorific value.

Введение

Сектор «Энергетика» вносит наиболее существенный вклад в выбросы парниковых газов (ПГ) в Российской Федерации (РФ). Так в 2021 г., по данным Национального доклада о кадастре (НДК, 2023), совокупные антропогенные выбросы парниковых газов в РФ составили 2156.6 млн т CO₂-экв. без учета вклада сектора «Землепользование, изменение землепользования и лесного хозяйства» (ЗИЗЛХ). Подавляющее большинство выбросов приходится на диоксид углерода (CO₂) – 1712 млн т CO₂. При этом вклад сектора «Энергетика» в совокупные выбросы парниковых газов РФ для 2021 г. составил 77.9%. Как следствие, проблема разработки и уточнения национальных коэффициентов выбросов в данном секторе является не только актуальной, но и приоритетной, поскольку все категории сектора, связанные с выбросами CO₂, являются ключевыми.

Выбросы ПГ из всех источников горения рассчитываются на основе данных о количествах и видах сожженного топлива (данных о деятельности, activity data) и соответствующих коэффициентах выбросов (emission factors) (МГЭИК, 2006). При этом при инвентаризации выбросов расчет может проводиться по подходам трех уровней. Первый уровень не учитывает национальную специфику в том смысле, что используются коэффициенты выбросов, приведенные по умолчанию в Руководящих принципах (МГЭИК, 2006). Начиная со второго уровня возможен учет национальной специфики – это введение национальных коэффициентов выбросов. Методический подход третьего уровня позволяет учитывать расчетные или измерительные данные о выбросах отдельных предприятий.

Расчеты в Национальном кадастре в подсекторе «Сжигание топлива», в части жидких топлив, до сих пор ведутся по 1 уровню, несмотря на то, что это ключевые категории. Оценки выбросов, произведенные с применением методологии 1-го уровня, обладают большей неопределенностью, в основном из-за неточности коэффициентов выбросов, приведённых в Руководящих принципах МГЭИК и чаще всего относящихся к устаревшим исследованиям, отражающим характеристики топлив, используемых в США или Европейских странах. Как следствие, еще одной целью при разработке национальных коэффициентов является снижение неопределенности при переходе на национальные коэффициенты, определяемые на основе компонентного состава российских жидких топлив и, снижение объединенной неопределенности итоговых оценок выбросов от сжигания жидких топлив.

В ходе рассмотрения Национального кадастра РФ международными экспертами в замечаниях к сектору «Энергетика» неоднократно отмечалась необходимость разработки национальных коэффициентов выбросов CO₂ от сжигания жидкого ископаемого топлива. Так, в отчете группы по проверке Национального кадастра РФ за 2020 год (ARR2020_RUS) сформулировано замечание E6, оставшееся с предыдущей проверки: «Определить национальное значение содержания углерода в жидком топливе или, в соответствии с пунктом 11 Руководящих принципов представления отчетности в Приложе-

нии I к РКИК ООН¹⁾; до тех пор, пока это не будет достигнуто, предоставьте обоснование в NIR²⁾ с объяснением причин, по которым это было невозможно». Замечание появилось впервые после проверки в 2018 г. и далее повторялось ежегодно до настоящего времени. На основании этого, профильное исследование и разработка национальных коэффициентов от сжигания жидких видов топлива были включены в план по усовершенствованию кадастра, как одни из наиболее приоритетных еще в 2018 году. Однако выполнить крупномасштабное исследование составов жидких топлив, производимых и применяемых в Российской Федерации, стало возможным только в рамках проекта ВИП ГЗ³⁾.

Современное состояние проблемы разработки национальных коэффициентов выбросов CO₂ от сжигания жидких топлив

Решение задачи о разработке национальных коэффициентов выбросов CO₂ от сжигания жидких топлив нетривиально, уникально и не выполнялось ранее в России. Важно было понять, какие аналитические и экспериментальные исследования требуется выполнить, какой объем данных является достаточным и научно-обоснованными для разработки национальных коэффициентов выбросов, какое количество проб считать репрезентативным, с учетом специфики планируемых работ, необходимости и возможности охвата, производимых на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) РФ жидких топлив с соблюдением принципов, заложенных в Руководящих принципах МГЭИК. В связи с этим был проанализирован международный опыт стран Приложения 1 РКИК ООН по исследованию компонентного состава жидких видов топлив и разработке соответствующих национальных коэффициентов выбросов.

В рамках анализа были изучены материалы инвентаризаций за различные годы, а также осуществлен поиск специализированных исследований жидких топлив, выполненных в Германии, США, Канаде, Австралии, Италии, Японии, Новой Зеландии, Нидерландах (NIR Australia, 2022; NIR Canada, 2022; NIR Germany, 2022; NIR Italy, 2022; NIR Japan, 2022; NIR Netherlands, 2022; NIR New Zealand, 2022; NIR United States, 2022). Поскольку большинство исследований являются конфиденциальными и доступ к подробным материалам ограничен, был выполнен анализ статей, научных и статистических материалов российских и зарубежных стран по данной тематике за период 2000-2022 гг. (Environment..., 2017; Статистика ..., 2022; Федеральная таможенная ..., 2017-2022; Технический регламент..., 2011; Перечень стан-

1) РКИК ООН – Рамочная конвенция ООН об изменении климата

2) NIR – National Inventory Submissions

3) Важнейший инновационный проект государственного значения, Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 г. №3240-р «Об утверждении инновационного проекта «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»

дартов к ТР ТС 013/2011; EFDB, 2022; EFDB Other, 2022; Ершов, Емельянов, 2015; Белоусов и др., 2011; Справочная..., 2018; Коломиец, 2011).

Наиболее полно раскрывает данные и специфику выполненных исследований по разработке национальных коэффициентов от сжигания жидких видов топлив Германия, опыт которой был взят за основу при организации научно-исследовательской работы (НИР) в России (CO₂ Emission ..., 2016; CO₂ Emission Factors ..., 2022).

Немецкая топливная статистика выделяет следующие виды жидких нефтепродуктов по видам топлив: бензин, дизельное топливо, керосин (в основном, авиационный), авиационный бензин, легкий топочный мазут, тяжелый топочный продукт и «прочие продукты нефтепереработки». Сжиженный нефтяной газ и нефтяной кокс, в приведенных исследованиях не рассматриваются. Для большинства выделяемых видов топлива национальный средневзвешенный коэффициент CO₂ определяется на основе системы базы данных EU ETS⁴), однако, для моторных видов топлива (дизельное топливо, автомобильный бензин), потребление которых, в основном, сконцентрировано у населения, данный подход не используется. Вместо этого применяются результаты исследовательских работ по определению компонентного состава топлива, выполненные Немецким обществом нефтегазовой науки и технологий (DGMK⁵) – национальной некоммерческой ассоциацией ученых и профессионалов нефтяной отрасли.

В работе «Состав бензинов, производимых немецкими нефтеперерабатывающими заводами» (DGMK 502-1, 2001-2002) представлены результаты исследований более 40 образцов автомобильных бензинов различных марок со всех 14 НПЗ Германии (по 1 пробе каждой марки топлива с каждого НПЗ) и проанализирован компонентный состав рассматриваемых видов топлива. Для каждой марки топлива определялось содержание углерода, исходя из анализа индивидуального состава образцов топлива. Исследование такого свойства бензина, как октановое число, не проводилось. Затем рассчитывалось средневзвешенное содержание углерода, исходя из содержания углерода в каждом из анализируемых образцов. Дополнительно в соответствии со стандартом DIN EN 14517 (DIN EN 14517, 2004) определялось суммарное содержание парафинов, наftenов, циклических и ациклических олефинов и ароматических соединений, для всех компонентов с одинаковым числом углерода. Результаты анализа компонентного состава приводились как по объемному содержанию, так и по массовому. В программе исследований приняли участие шесть нефтяных компаний, производящих жидкое топливо на территории Германии. По итогу испытаний среднее отклонение данных анализа между лаборатори-

⁴) Европейская система торговли квотами на выбросы (EU Emissions Trading System (EU ETS)). URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en (дата обращения: 07.12.2023)

⁵) DGMK German Society for Sustainable Energy Carriers, Mobility and Carbon Cycles e.V. We, URL: <https://dgmk.de/en/> (дата обращения: 07.12.2023)

ями составило около 15%. Ниже в табл. 1 систематизирован перечень проводимых исследований и охват ими топлив различных нефтяных компаний.

Таблица 1. Перечень исследований и охват ими топлив различных нефтяных компаний в рамках работ по исследованию компонентного состава бензинов, выполненного в Германии

Table 1. List of studies and their coverage of fuels from different oil companies as part of gasoline component composition studies carried out in Germany

Анализируемое вещество / вид исследования	Нефтяные компании					
	BP	ARAL	ESSO	TOTAL	SHELL	OMV
Отдельные неароматические компоненты (газовая хроматография)		X				X
Отдельные ароматические компоненты (газовая хроматография)		X				
Групповой анализ PIONA	X		X	X		
Определение полициклических ароматических углеводородов	X	X			X	
Определение содержания галогенов		X				X
Определение содержания серы, азота		X			X	
Определение содержания активной серы		X		X		
Определение содержания тяжелых металлов		X				X

Аналогичная работа была проведена для дизельного топлива (ДТ), оценены летние и зимние образцы с 13 НПЗ. По результатам анализа были рассчитаны средние значения для летних и зимних видов ДТ (DGMK 583, 2002). В 2021 г. исследование DGMK было актуализировано, поскольку поменялись требования к топливу и процедурам его тестирования, представлена новая работа DGMK 821 (DGMK 821, 2019-2021). Результаты для всех исследуемых параметров рассмотрены с оценкой средних и предельных значений. Работы имеют статус конфиденциальных, подробные данные по НПЗ не раскрываются. Результаты исследований регулярно актуализируются Германией (в настоящее время ведутся работы по новой исследовательской программе DGMK 879, 2022-2023).

На основе исследований DGMK, Агентство по охране окружающей среды Германии выпускает в открытом доступе сводные публикации о национальных коэффициентах выбросов CO₂ для ископаемых видов жидкого топлива (автомобильного бензина и ДТ). Сведения о коэффициентах выбросов и методическом подходе изложены в разделе 18.8 Национального доклада о кадастре Германии (NIR Germany, 2022), который, в зависимости от года, может содержать более или менее подробную информацию.

Методы и материалы

Коэффициент выбросов CO_2 от сжигания топлива зависит от содержания углерода в конкретном виде топлива и такого параметра, как теплотворная способность топлива. Теплотворная способность бывает низшей⁶⁾ и высшей⁷⁾ (НТС, ВТС). В руководящих принципах (МГЭИК, 2006) коэффициенты выбросов для CO_2 при сжигании ископаемых видов топлива выражаются в расчете на энергетические единицы. При этом допускается при переводе натуральных единиц в энергетические использовать национальные коэффициенты выбросов, рассчитанные как на основе НТС, так и ВТС. Также предполагается, что весь углерод, содержащийся в топливе, окисляется до CO_2 – принцип полного окисления топлива (МГЭИК, 2006).

В общем виде формула расчета коэффициента выбросов CO_2 от сжигания топлива выглядит следующим образом (1):

$$\text{Коэффициент выбросов } \text{CO}_2 = \frac{C}{\text{НТС}} \times 44/12, \quad (1)$$

где C – содержание углерода в топливе, НТС – низшая теплотворная способность топлива.

Выбор видов жидких топлив, участвующих в эксперименте, был выполнен на основе перечня топливно-энергетических ресурсов Росстата. В настоящее время Кадастр не использует такую степень детализации, однако с учетом работ, заложенных по ВИП ГЗ на 1 и 2 этапах, запланирована возможность выполнения оценок с большей степенью детализации и дезагрегации. Поскольку нормативные документы и практика в РФ предполагают использование именно НТС, проводимое исследование было направлено в первую очередь на получение информации и расчете коэффициентов выбросов для данного параметра, ВТС не была включена в обязательный перечень параметров.

Перечни приоритетных видов жидких топлив и исследуемых показателей в рамках НИР по ВИП ГЗ приведены в табл. 2.

Национальный кадастр оперирует не только данными за текущий оцениваемый год, но и за весь временной интервал, начиная с 1990 года. Состав жидких видов топлив подвержен изменению с течением времени. Этому способствует как изменение нормативных документов – ГОСТов, стандартов на изготавливаемое и применяемое в различных отраслях топливо, так и измене-

⁶⁾ Низшая теплота сгорания: количество освобожденной энергии при сжигании единицы массы топлива при постоянном давлении, причем все продукты, включая воду, являются газообразными. См. ГОСТ 21261-2021

⁷⁾ Высшая теплота сгорания: количество освобожденной энергии при сжигании единицы массы топлива в камере постоянного объема, причем продукты являются газообразными, за исключением воды, которая конденсируется до жидкого состояния. См. ГОСТ 21261-2021

ние технологий производства, введение новых видов установок, новых составов и марок топлива. Все это отражается на изменении содержания углерода в топливах в течение более чем 30-летнего временного интервала. Соответственно восстановление данных, необходимых для расчета содержания углерода в топливах по всему временному ряду, было заложено в работы по исследованию компонентного состава приоритетных видов жидких топлив.

Таблица 2. Перечни приоритетных видов жидких топлив и исследуемых показателей

Table 2. Lists of Prioritised Liquid Fuels and Research Indicators

№ п/п	Наименование топлива	Показатели
1	Бензин АИ-92 (в том числе с экологическими классами К2-К5) АИ-95 (в том числе с экологическими классами К4-К5) АИ-98 и выше (класс топлива К5)	1. Низшая теплота сгорания, МДж/кг: – минимальное значение выборки; – максимальное значение выборки; – средневзвешенное значение выборки; – неопределенность средневзвешенного значения 2. Индивидуальный и групповой компонентный состав топлив (% масс.)
2	Дизельное топливо Дизельное летнее топливо (в том числе с экологическими классами К2-К5) Дизельное зимнее топливо (в том числе с экологическими классами К2-К5) Дизельное межсезонное топливо (в том числе с экологическими классами К2-К5) Арктическое дизельное топливо (в том числе с экологическими классами К2-К5) Судовое дизельное топливо*	
3	Мазут Мазут топочный Мазут флотский**	
4	Авиационный керосин	

Примечания: * – судовое дизельное топливо по смыслу является синонимом таким понятиям, как судовое маловязкое топливо или судовое дистиллятное топливо;

** – мазут флотский (термин согласно ГОСТ 10585-2013, 2013) схож по составу с судовым остаточным топливом (термин согласно ISO 8217: 2017, 2017). Объемы производства флотского мазута незначительны, поэтому в работе проводится исследование судового остаточного топлива

Разработанная концепция реализации НИРа по определению компонентного состава приоритетных видов топлив включала 6 последовательных этапов:

- анализ рынка жидких топлив Российской Федерации в 2010-2021 гг. (включая объемы производства, экспорта/импорта в разрезе нефтеперерабатывающих компаний и отдельных заводов, в сумме определяющих не менее 95% объема производства);

- анализ компонентного состава выбранных видов жидких топлив в 2010-2021 гг. (в т.ч. нормативно-технической документации), разработка расчетной модели предсказания компонентного состава пула производства выбранных видов жидких топлив;

- экспериментальное исследование отдельных образцов выбранных видов жидких топлив для оценки точности работы модели предсказания состава жидких топлив и её параметризации;

- выявление параметров (факторов), косвенно или прямо влияющих на общее содержание углерода в выбранных видах жидкого топлива;

- восстановление по косвенным факторам коэффициентов пересчета содержания углерода в выбранных видах жидких топлив в 1990-2009 гг.;

- подготовка предложений по сбору исходных данных для расчета коэффициентов пересчета содержания углерода и апробации итогов работ.

Исполнителем данной работы выступило ООО «Центр мониторинга новых технологий», экспериментальное исследование образцов жидкого топлива проводилось совместно с Институтом нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (ИНХС РАН).

В ходе выполнения работ по НИР исследовался компонентный состав таких видов жидких топлив, как автомобильные бензины, авиационный керосин (далее керосин), дизельные топлива, судовые дистиллятные и остаточные топлива (ТМС и ТСО), топочный мазут (мазут) (Ершов и др., 2024). Представленный в рамках данной работы подход к исследованию коэффициентов выбросов выбранных видов жидких топлив является инновационным и ранее не применялся для выполнения подобных задач на национальном уровне. В международной практике для уточнения коэффициентов выбросов выполняют экспериментальную работу по испытаниям некой репрезентативной выборки образцов топлив с получением среднего значения и оценкой неопределенности на основании данной выборки. Данный подход нереализуем в масштабах РФ, т.к. выполнить экспериментальные исследования образцов более 95% рынка производителей всех выделенных жидких видов топлив, включая сезонность некоторых топлив, практически невозможно (большой объем исследований, труднодоступность получения всех требуемых образцов, большое количество производителей и технологий производства). Поскольку ранее подобные исследования не проводились, возникает сложность оценки изменения анализируемых параметров в течение временного ряда (1990-2021 гг.). Поэтому основное исследование выполнено аналитическим способом с помощью разработанной расчетной модели предсказания компонентного состава выбранных видов жидких топлив.

В качестве основного источника данных для модели расчета и предсказания использована информация из ежегодных статистических сборников Центрального Диспетчерского Управления ТЭК (ЦДУ ТЭК) – филиала ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, в основе которых лежат статистические формы

«36-ТП» (ЦДУ ТЭК, 2022). Перечень отраженных в статистике данных включает не только объемы производства выбранных видов жидких топлив на нефтеперерабатывающих заводах РФ (с учетом марочной структуры, экологических классов и климатических групп), но и фактические годовые загрузки технологических установок в исследуемый промежуток времени, а также важнейшие процессы производства топлив, такие как первичная перегонка, изомеризация, каталитический риформинг, гидроочистка керосинов и дизельных топлив, каталитический крекинг, алкилирование и т.д.

В модель заложена последовательность, которая логически связывает процессы производства топлив с компонентами пула производства каждого рассматриваемого вида жидкого топлива и элементным составом топлива, а также с его характеристиками и свойствами. Важнейшим элементом модели является набор коэффициентов, отражающих выход компонентов топлив на установках и базовые свойства, использующиеся для подбора компонентного состава. Набор коэффициентов основывался как на литературных данных (в т.ч. Капустин, Гуреев, 2015; Капустин и др., 2011; Ахметов и др., 2006; Шакун и др., 2020; Чузлов, 2018; Šindelářová et al., 2022; Имашева, 2016; Сорокина, 2021; Нефтегаз, 2017), так и уточнялся индивидуально для каждого НПЗ. На основании рассчитанных компонентных составов топлив и дополнительного набора исходных данных о свойствах компонентов производилась оценка искомых свойств топлив – группового углеводородного состава, содержания углерода и низшей теплоты сгорания (ГОСТ 22854-2015, 2020).

При распространении модели на более ранние годы (1990-2010 г.) необходимо было выявить параметры, с помощью которых возможно вычислить анализируемые в рамках настоящей работы свойства жидких топлив. Ввиду более низкого качества и количества исходных данных, полученная таким образом модель является более грубой, однако большинство намеченных трендов были спрогнозированы с хорошей точностью. Дополнительно рассматривались изменения в нормативной документации, доступные данные по объемам потребления октаноповышающих присадок и объемам производства топлив (с учетом убыли/ввода новых мощностей). Выявлено, что основным параметром, влияющим на содержание углерода в топливах в течение временного периода (1990-2021 гг.), является объем производства различных компонентов исследуемых нефтепродуктов (бензина каталитического крекинга, риформата для бензинов, газойлей вторичных процессов, прямогонных дизельных топлив для дизелей и т.д.).

Экспериментальное исследование выполнено для 62 образцов жидких видов топлива. Выбор образцов с различных НПЗ проходил по 4 критериям: доля производства топлива данными НПЗ в стране, географическое расположение НПЗ (федеральные округа), принадлежность НПЗ к вертикально-интегрированным или независимым компаниям и технологии производства топлива. Для каждого вида топлива проводился анализ 5 и более образцов, кроме арктического дизельного топлива, производством которого занимается относительно небольшое количество НПЗ, поэтому в данном случае недостаток образцов незначительно влияет на общий объем покрытия рынка. Указан-

ный набор образцов позволил сформировать репрезентативную выборку данных и дать понимание реальных тенденций, происходящих в области производства российских топлив. Общий охват рынка образцами в зависимости от вида топлива составил от 37.3% до 77.1%.

С целью снижения расхождения экспериментальных и расчетных данных, были проведены корректировки модели по каждому виду топлива. Вносимые изменения были направлены на уточнение составов и объемов производства исходных компонентов, в ряде случаев проводились корректировки рецептур.

Результаты

Практически для всех топлив во временном ряду замечена тенденция к снижению содержания углерода и росту доли водорода за счет увеличения доли менее ароматических компонентов (изомеризата и алкилата для бензина, дистиллятов гидрокрекинга для ДТ и реактивного топлива), однако у судовых топлив из-за введения ограничения по содержанию серы наблюдается обратное движение – увеличение доли углерода за счет снижения доли серы. Между собой марки бензинов также расположены вполне закономерно: наибольшее количество углерода в бензине АИ-92, так как в нем минимальное количество окислительных добавок, минимальное количество углерода в АИ-98 по обратной причине. Резкое снижение углерода в АИ-98 в 1998 г. вызвано небольшим количеством заводов-производителей, когда прекращение выпуска данного бензина даже одним из заводов способно внести значительный вклад в значение среднего содержания углерода. Содержание углерода в реактивных топливах относительно бензинов меняется незначительно, а снижение доли углерода к 2021 г. связано с увеличением содержания гидрообработанных компонентов в пуле. Содержание углерода во всех марках дизельных топлив в целом стабильно, что обусловлено отсутствием серьезных изменений рецептур получения дизельных топлив. Содержание углерода в судовых дистиллятных топливах нестабильно из года в год, из-за небольших объемов производства и широкого диапазона возможных рецептур данного топлива. Кроме того, с 1990 по 1998 годы данное топливо не фигурировало в отчетах ЦДУ ТЭК, вероятно, по причине малого производства в стране.

Полученные закономерности изменения низшей теплоты сгорания топлив в общем виде коррелируют с выделенной выше динамикой изменения элементного состава. С 1990 по 2009 гг. по мере возрастания доли насыщенных углеводородов в компонентном пуле бензинов происходит плавный рост теплоты сгорания. Для ДТ замечен некоторый спад теплоты сгорания к 1990 году, что является следствием снижения мощностей гидропроцессов и увеличением доли производства внеклассового дизельного топлива. Некоторое увеличение НТС для судовых остаточных и дистиллятных топлив в 2020-2021 гг. связано с добавлением в рецептуры данных видов топлив большего количества высококачественных низкосернистых компонентов в связи с ужесточением экологического регулирования судовых топлив (рис. 1).

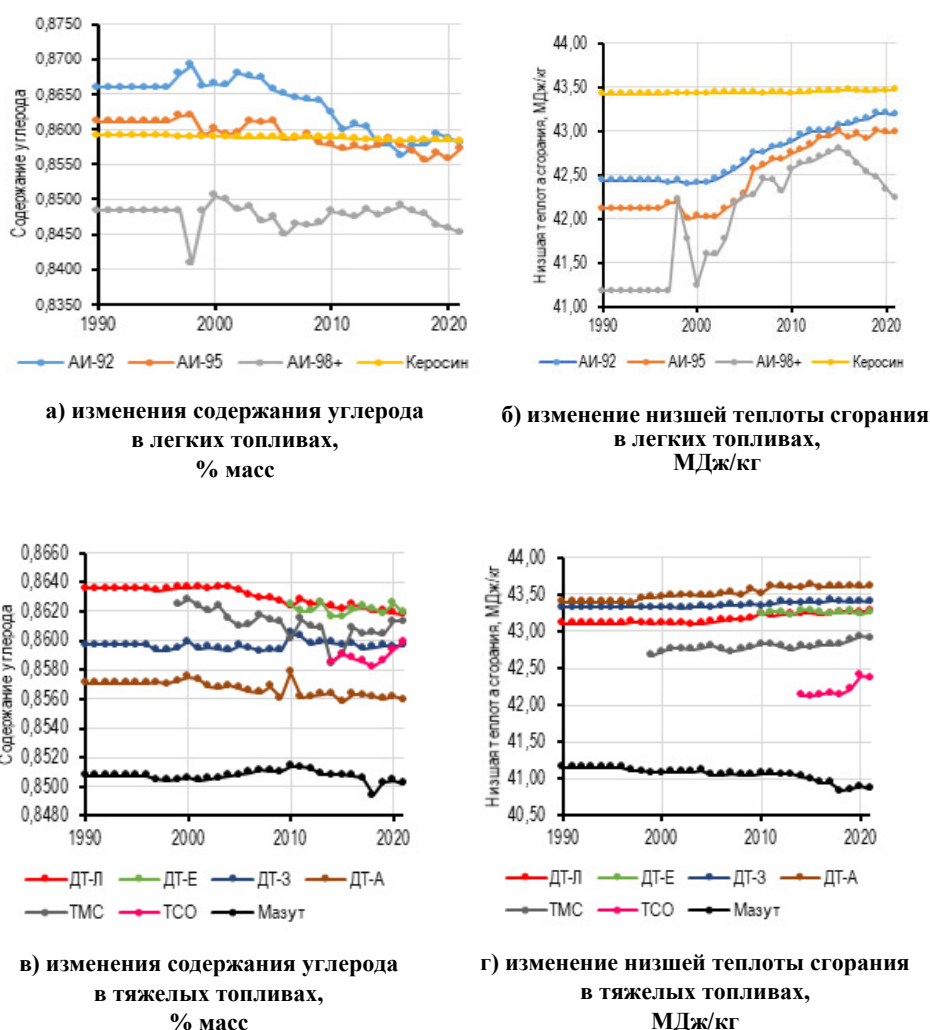


Рисунок 1. Динамика изменения содержания углерода и НТС в исследуемых видах жидких топлив (1990-2021 гг.)

Figure 1. Dynamics of changes in carbon content and LHV in the analyzed liquid fuels (1990-2021)

В ходе экспериментального анализа 62 образцов топлив отклонение рассчитанных коэффициентов выбросов от экспериментально определенных составило не более 2.5% (до корректировки модели). При этом два наибольших отклонения наблюдались для наиболее сложных для моделирования топлив: судового маловязкого топлива и судового остаточного топлива. Результат полученных в ходе экспериментального анализа содержания углерода и НТС в анализируемых образцах топлив приведен в табл. 3.

Таблица 3. Среднее содержание углерода и НТС в анализируемых образцах жидких видов топлив

Table 3. Average carbon content and LHV in analyzed liquid fuel samples

Топливо	Количество образцов	Среднее содержание углерода, % масс	Средняя низшая теплота сгорания, МДж/кг
АИ-92	7	0.8628	42.66
АИ-95	7	0.8613	42.76
АИ-98/100	6	0.8509	42.33
Керосин	5	0.8575	43.50
ДТ-Л	5	0.8609	43.28
ДТ-Е	6	0.8617	43.33
ДТ-З	7	0.8601	43.31
ДТ-А	4	0.8598	43.38
ТМС	5	0.8526	43.24
ТСО	5	0.8626	43.12
Мазут	5	0.8534	41.08

С целью оценки сходимости расчетной модели было проведено сопоставление данных, полученных расчетным образом за последний год исследования (2021 г.), и экспериментальных данных (образцы отобраны на НПЗ в 2023 г.) (см. рис. 2). В целом, результаты оценки сходимости показывают, что в большинстве своем топлива, имеют небольшое расхождение между экспериментальными и расчетными данными или расхождения, не выходя за пределы интервала неопределенности. Судовое дистиллятное топливо и арктическое дизельное имеют расхождения значений, превышающие интервал неопределенности, как для низшей теплоты сгорания, так и для содержания углерода. В случае ТМС погрешность обусловлена многообразием возможных рецептур приготовления товарных композиций, которые, к тому же, могут меняться в течение года, поэтому в рамках модели очень проблематично с хорошей точностью осуществить предсказание свойств отдельных образцов данного вида топлива. Для дизельного арктического топлива – около 30% рынка его производства занимает всего один НПЗ, поэтому возникает высокая вероятность погрешности при использовании усредненных исходных данных для расчета анализируемых свойств в модели, в частности элементных и групповых составов компонентов. Достаточно высокая погрешность характерна также для судовых остаточных топлив, что, скорее всего, связано с неточностью экспериментального определения НТС данного топлива. Для бензина АИ-92 погрешность обусловлена неполным охватом технологий приготовления данного топлива в случае экспериментальных исследований, т.к., по всей видимости, 7 образцов недостаточно для нахождения среднего значения низшей теплоты сгорания среди 28 заводов, производящих АИ-92. Результаты сравнительного анализа среднего содержания углерода и низшей теплоты сгорания для расчетных и экспериментальных данных приведены на рис. 2.

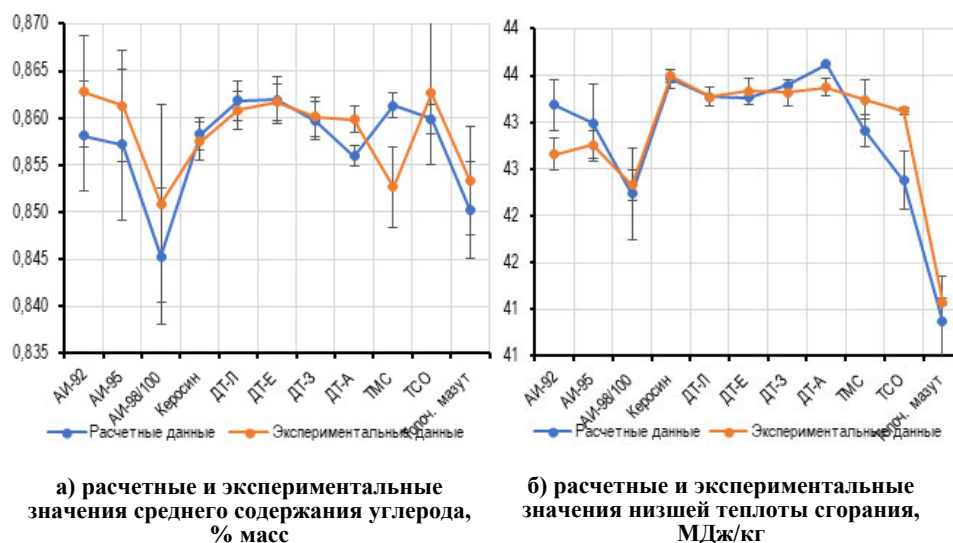


Рисунок 2. Сравнение расчетных (2021 г.) и экспериментальных значений (2023 г.) среднего содержания углерода и НТС в исследуемых видах жидких топлив

Figure 2. Comparison of calculated (2021) and experimental (2023) values of the average carbon content and LHV in the analyzed liquid fuel types

В рамках выполненной корректировки модели удалось улучшить сходимость модели всех топлив, кроме дизельного арктического топлива и бензина. Подход последовательного уточнения коэффициентов позволил для каждого отдельного НПЗ достичь целевой ошибки прогнозирования выхода топлив менее 5%, что в национальном масштабе обеспечивает сходимость модели на уровне не более 1-2%.

Динамика изменения коэффициентов выбросов, рассчитанных для каждого года периода 1990-2021 гг. в легких и тяжелых топливах, выраженные в энергетических ($\text{кг CO}_2/\text{ТДж}$) и натуральных единицах ($\text{кг CO}_2/\text{кг топлива}$), представлена на рис. 3.

Экологические требования к топочным мазутам, как и к остаточному типу топлив, практически не меняются согласно нормативным документам, поэтому в связи с общей тенденцией к увеличению глубины переработки на российских НПЗ, в состав мазутов поступают более низкокачественные и тяжелые фракции, которые не находят применения в других процессах. Исходя из этого, среди всех типов исследуемых топлив с 1990 по 2021 гг. только для мазутов наблюдается увеличение коэффициента выбросов. Качество остальных топлив улучшается, что в конечном итоге ведет к снижению значений коэффициентов выбросов CO_2 от сжигания жидких топлив.

Сведение значений коэффициентов выбросов, полученных в результате НИР в ходе экспериментального и расчетного анализа (в натуральных и энергетических единицах), а также коэффициентов по умолчанию из Руководящих принципов (МГЭИК 2006) представлено в табл. 4.

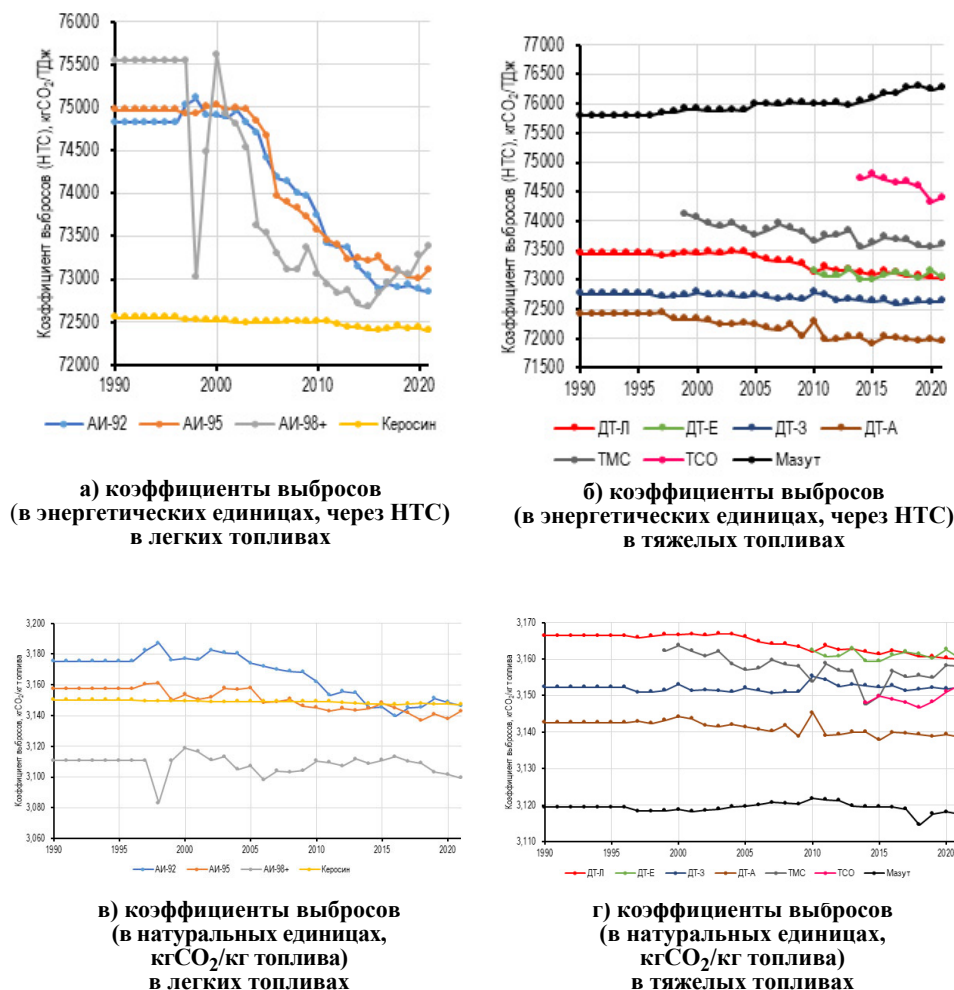


Рисунок 3. Динамика изменения коэффициентов выбросов в анализируемых видах жидких топлив

Figure 3. Dynamics of the changes in the emission factors for the analyzed liquid fuels

Расчетные и экспериментальные значения полученных энергетических коэффициентов показали следующие тенденции: в обоих случаях коэффициенты выбросов CO_2 для автомобильных бензинов и авиационного керосина несколько выше приведенного в Руководящих принципах (МГЭИК, 2006), а для дизельных топлив и мазутов – ниже. Кроме того, Руководящие принципы не дают значений для судовых топлив, однако в практике, в том числе других стран, для этих видов топлив используется значение коэффициентов, приведенное для ДТ.

Энергетические коэффициенты выбросов CO_2 , которые в настоящее время применяются в Национальном кадастре (НДК, 2023) для жидких топлив, имеют свою специфику (см. табл. 5).

Таблица 4. Коэффициенты выбросов CO₂ исследуемых видов жидких топлив: коэффициенты по умолчанию (МГЭИК, 2006), значения коэффициентов, полученные расчетным и экспериментальным способом

Table 4. CO₂ emission factors of the studied liquid fuels: default emission factors (IPCC, 2006), emission factors obtained by calculation and experiment (kgCO₂/TJ)

Топливо	МГЭИК, 2006, кгCO ₂ /ТДж	Среднее расчетное значение (1990-2021 гг.), кгCO ₂ /ТДж	Отклонение от МГЭИК, %	Экспериментальное значение (2023 г.), кгCO ₂ /ТДж	Отклонение от МГЭИК, %	Среднее расчетное значение (1990-2021 гг.), кгCO ₂ /кг топлива
Бензин	69300	73341	5.8	73915	6.7	3.156
Керосин	71500	72494	1.4	72280	1.1	3.149
ДТ	74100	73209	-1.2	72837	-1.7	3.162
ТМС	-	73787	-	72302	-	3.158
ТСО	-	74606	-	73352	-	3.149
Мазут	77400	75973	-1.8	76168	-1.6	3.119

Таблица 5. Коэффициенты выбросов CO₂ для бензина и ДТ из Руководящих принципов (МГЭИК, 2006) и применяемые в НДК в категориях сектора «Энергетика», кгCO₂/ТДж

Table 5. CO₂ emission factors for gasoline and diesel from the guidelines (IPCC, 2006) and applied in the NIR in the energy sector categories, kgCO₂/TJ

Топливо	НДК		МГЭИК, 2006
	Автотранспорт	Стационарное сжигание и иные виды техники	
Бензин	72920	69300	69300
ДТ	73850	74100	74100

Коэффициенты выбросов для категории Автотранспорт были внедрены в Национальный кадастр по рекомендации группы экспертов в 2013 г., как более репрезентативные. Важно заметить, что бензин практически полностью используется для расчетов по автотранспорту – это более 95% от всего годового количества. Незначительная его часть используется в категориях, связанных со сжиганием иными видами техники, для которых при расчетах используется коэффициент из Руководящих принципов (МГЭИК, 2006) – 69300 кгCO₂/ТДж. Для ДТ наблюдается аналогичная картина, с той разницей, что коэффициент из Руководящих принципов (МГЭИК, 2006) используется в основном в категориях, связанных со сжиганием на стационарных источниках.

Используемые ранее в Кадастре коэффициенты выбросов CO₂ от сжигания жидких топлив выражены в энергетических единицах (кгCO₂/ТДж), при этом для их расчета применялось значение низшей теплотворной способности топлив, приведенное по умолчанию в Руководящих принципах (МГЭИК, 2006). Перевод исходных данных об использовании топлива из натуральных единиц

(тонн) в тонны условного топлива (тут) осуществляется в российской статистике с применением калорийных эквивалентов топлив, содержащихся в методологии Росстата⁸⁾. Полученные национальные значения НТС (НИР) обладают значительной временной изменчивостью и отличаются как от значений по умолчанию из Руководства (МГЭИК, 2006), так и от величин Росстата. Поэтому перевод всех коэффициентов в натуральные единицы ($\text{кгСО}_2/\text{кг}$ топлива) позволяет избежать неопределенности, связанной с использованием различных значений теплоты сгорания топлива.

Несмотря на то, что все национальные коэффициенты (в натуральных единицах) незначительно превышают коэффициенты МГЭИК по умолчанию, кроме автомобильного бензина для автотранспорта, при внедрении полученных значений в Национальный кадастр, в сумме для всех видов топлива после 2013 г. наблюдается снижение выбросов по сравнению с применением коэффициента по умолчанию (рис. 4). Связано это с тем, что в начале временного ряда (1990-е годы) расход автомобильного бензина был сравнительно небольшой, а мазута, ДТ и др. жидких топлив много больше, чем в последние годы. При этом потребление автомобильного бензина, наоборот, в последние годы значительно увеличивается. Кроме того, для всех жидких топлив (кроме бензина) при внедрении национальных коэффициентов увеличивается сокращение выбросов в последние годы по сравнению с 1990 г. В абсолютном выражении в 2021 г. выбросы при сжигании жидких видов топлива сократились на 338 тыс. тонн CO_2 , а в 1990 г. увеличились на 2260 тыс. тонн CO_2 .

Неопределенность коэффициентов выбросов оценена менее 1% для всех рассматриваемых видов топлив. Итоговые значения неопределенностей, осредненные по маркам и за весь временной период (1990-2021 гг.), составили для бензина – 0.33%, керосина – 0.13%, ДТ – 0.17%, ТМС – 0.51%, ТСО – 0.48%, топочного мазута – 0.39%. Анализ неопределенностей включал в себя: а) рассмотрение неопределенностей, вызванных различием в составе каждого компонента (алгоритм бутстрэп); б) неопределенностей, обусловленных различием компонентных составов топлив (рецептур) среди НПЗ; в) вычисление итоговых неопределенностей.

В дальнейшем в качестве национальных параметров выбросов от сжигания жидких видов топлив будут рассматриваться две независимые характеристики: коэффициент выбросов CO_2 в натуральных единицах ($\text{кг СО}_2/\text{кг}$ топлива) и низшая теплотворная способность топлива (МДж/кг). При необходимости перехода к значениям коэффициентов, выраженных в энергетических единицах, необходимо убедиться, что и для перевода топлива в ТДж, и для выражения коэффициентов в $\text{кгСО}_2/\text{ТДж}$ использованы одни и те же значения НТС. В Национальном кадастре для перевода данных о расходе топлива в энергетические единицы планируется использовать, как и ранее, значения НТС топлив, приведенные в методических документах Росстата

⁸⁾ Например, в Приложении к Официальной статистической методологии составления топливно-энергетического баланса Российской Федерации (Приказ Федеральной службы государственной статистики от 4 апреля 2014 г. № 229)

(для того чтобы избежать расхождения данных Национального кадастра с данными официальной статистики).

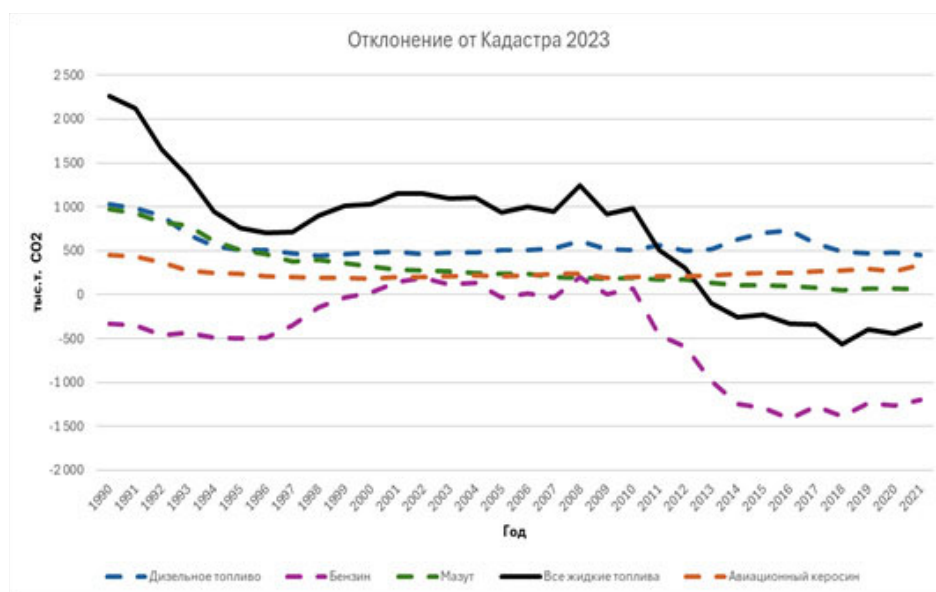


Рисунок 4. Изменение выбросов CO₂ (тыс. т) от сжигания жидких топлив (всего и отдельно для бензина, дизельного топлива, мазута и авиационного керосина) при внедрении национальных коэффициентов выбросов

Figure 4. Change in CO₂ emissions (thousand metric tons) from the combustion of liquid fuels (total and separately for gasoline, diesel fuel, residual fuel oil, and jet kerosene) using national emission factors

Дискуссия

Анализ базовых коэффициентов выбросов из Руководящих принципов (МГЭИК, 2006), был выполнен в силу того, что полученные в ходе НИР значения коэффициентов по бензину (в энергетических единицах) имеют ощутимое расхождение: коэффициент выбросов для бензина из Руководящих принципов (МГЭИК, 2006) равен 69300 кгCO₂/ТДж против расчетного 73468 кгCO₂/ТДж и экспериментального 73915 кгCO₂/ТДж. Выявлено, что все значения коэффициентов для жидких топлив были перенесены в Руководящие принципы (МГЭИК, 2006) из Руководств 1996 года (МГЭИК, 1996). Первоисточником коэффициента выбросов по умолчанию для бензина из Руководств является работа (Grubb, 1989). В Руководящих принципах указана не сама работа, а ссылка на семинар рабочей группы (IEA/OECD, 1989). По уточненной информации в работе (Grubb, 1989) значения коэффициента были основаны на высшей теплотворной способности, которые затем были преобразованы в НТС путем допущения разницы между теплотворными способностями в 5% (предположение Международного энергетического агентства).

С целью выявления закономерности и обоснования изменчивости был проведен сравнительный анализ национальных коэффициентов выбросов для

выбранных стран Приложения 1⁹⁾ (Германия, США, Канада, Австралия, Италия, Япония, Новая Зеландия, Нидерланды). Рассмотрены отклонения национальных коэффициентов стран Приложения 1 от коэффициентов выбросов по умолчанию из Руководящих принципов (МГЭИК, 2006) для разных видов жидкого топлива (табл. 6 и 7).

Таблица 6. Принятые по умолчанию коэффициенты выбросов CO₂ от сжигания жидких видов топлива (МГЭИК, 2006)

Table 6. Default CO₂ emission factors from liquid fuel combustion (IPCC, 2006)

Топливо	МГЭИК, 2006, кгCO ₂ /ТДж	95% доверительный интервал	
		Нижний предел	Верхний предел
Бензин	69 300	-2.6%	5.3%
Авиационный керосин	71 500	-2.5%	4.1%
Дизельное топливо	74 100	-2.0%	0.9%
Судовое дизельное топливо / Судовое дистиллятное	74 100	-2.0%	0.9%
Судовое остаточное / Мазут флотский	74 100	-2.0%	0.9%
Мазут топочный	77 400	-2.5%	1.8%

Как видно из табл. 7, абсолютно все национальные коэффициенты по дизельному топливу ниже приведенных в Руководящих принципах (МГЭИК, 2006) коэффициентов по умолчанию. Похожая динамика, но не в абсолютном значении, наблюдается также для судовых видов топлива. В отношении бензинов, авиационного топлива и топочного мазута замечено, что более высокие значения коэффициентов выбросов характерны для тех стран, которые используют при расчете НТС, а более низкие значения – ВТС. Отмечено, что если страна для формирования национальных коэффициентов выбросов в энергетических единицах использует ВТС, то разработанные национальные коэффициенты имеют значение ниже, чем те, которые приводятся по умолчанию в Руководствах МГЭИК (кгCO₂/ТДж).

В то же время, поскольку все источники и нормативные документы содержат различные значения НТС и ВТС, то сравнение коэффициентов выбросов в энергетических единицах не дает реального представления о том, как различается содержание углерода в коэффициентах выбросов разных стран. В связи с чем был осуществлен перевод всех указанных выше коэффициентов в натуральные единицы: кгCO₂/кг топлива. Поскольку ряд стран приводит коэффициенты выбросов, выраженные в кгCO₂/л топлива, при переводе в натуральные единицы были использованы стандартные значения плот-

⁹⁾ National Inventory Submissions 2022. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/national-inventory-submissions-2022> (дата обращения: 07.12.2023)

ности топлив. Такой подход позволяет провести сравнительный анализ значений коэффициентов, которые не зависят от используемой теплоты сгорания топлива, как в вышеописанном варианте.

Таблица 7. Отклонение национальных коэффициентов выбросов выборочных стран Приложения 1 от коэффициента выбросов по умолчанию (МГЭИК, 2006) для разных видов жидкого топлива, %

Table 7. Deviation of the national emission factors of a sample Annex 1 countries from the default emission factor (IPCC, 2006) for different liquid fuels, %

Топливо	Германия (НТС)	Италия (НТС)	Нидерланды (НТС)	США (ВТС)	Канада (ВТС)	Австралия (ВТС)	Япония (ВТС)	Н.Зеландия (ВТС)
Бензин	7.5	5.2	4.0	1.9	-0.5	-2.8	-1.1	-3.8
Авиационный керосин	2.5	-	1.4	3.5	-4.5	-2.7	-4.9	-4.6
Дизельное топливо	-0.1	-0.2	-3.6	-1.3	-6.0	-6.0	-4.7	-6.7
Судовое дизельное топливо / Судовое дистиллятное	-0.1	3.1	-	-1.3	-	-	-0.1	-1.5
Судовое остаточное / Мазут флотский	-0.1	-	-	-1.6	-	-	-	-
Мазут топочный	2.6	3.8	0.0	-3.1	-4.3	-5.2	-5.6	-5.6

Пример такого сравнения для коэффициентов выбросов от сжигания бензина, дизельного топлива, авиационного керосина и мазута приведен в табл. 8.

Выраженные через натуральные единицы коэффициенты выбросов передают в этом случае совершенно иную ситуацию. Видно, что отклонения от базового коэффициента по бензину из Руководящих принципов (МГЭИК, 2006) для всех переведенных национальных коэффициентов выборочных стран выше, чем коэффициент по умолчанию. При этом разброс отклонений находится в диапазоне от 1.8% до 3.2% со средним значением отклонения в 2.6%. Отклонение от базового коэффициента разработанного национального коэффициента РФ по бензину составляет 2.8%, что близко к медианному значению отклонений национальных коэффициентов выбросов рассмотренных стран Приложения 1.

Можно также заметить, что для дизельных топлив и авиационного керосина разработанные национальные коэффициенты в большинстве случаев ниже, чем коэффициент по умолчанию. Разброс относительно коэффициента по умолчанию больше, чем для бензина и в случае мазута достигает 3.9% (по абсолютному значению).

Таблица 8. Значения и отклонения национальных коэффициентов стран Приложения 1 и национальных коэффициентов РФ, от коэффициента выбросов CO₂ из Руководящих принципов (МГЭИК, 2006) для выборочных видов жидких топлив, кгCO₂/кг топлива

Table 8. Values and deviations of the national emission factors of Annex 1 countries and preliminary national coefficients of the Russian Federation from the CO₂ emission factor from the Guidelines (IPCC, 2006) for selected liquid fuels, kgCO₂/kg fuel

Источник	Бензин	Отклонение от МГЭИК, %	ДТ	Отклонение от МГЭИК, %	АК	Отклонение от МГЭИК, %	Мазут	Отклонение от МГЭИК, %
Руководящие принципы (МГЭИК, 2006)	3.07	-	3.19	-	3.17	-	3.13	-
Разработанные национальные коэффициенты РФ	3.16	2.8	3.16	-0.7	3.15	-0.6	3.12	-0.2
НДК Германии	3.17	3.2	3.17	-0.7	3.12	-1.4	3.21	2.6
НДК Канады	3.16	2.9	3.19	0.1	3.20	1.0	3.25	3.9
НДК Австралии	3.16	2.9	3.21	0.8	3.20	1.1	3.01	-3.8
НДК Италии	3.15	2.7	3.15	-1.1	3.15	-0.5	3.13	0.2
НДК Японии	3.14	2.2	3.12	-2.1	3.09	-2.3	3.14	0.5
НДК Новой Зеландии	3.14	2.1	3.18	0.3	3.16	-0.2	3.15	0.8
НДК Нидерланды	3.13	1.8	3.13	-1.7	3.11	-1.8	3.05	-2.4

Результаты сравнения коэффициентов выбросов разных стран по бензину с коэффициентом по умолчанию (МГЭИК, 2006) дают основание полагать, что он неоправданно занижен и не соответствует действительности. В подтверждение предположения об ошибочности значения коэффициента можно привести результат экспериментального исследования одного из низкоароматичных компонентов товарных бензинов (см. табл. 9).

Для легкого бензина гидрокрекинга показатели выбросов диоксида углерода составили 69566 кгCO₂/ТДж, что превышает значение, указанное в Руководящих принципах (МГЭИК 2006). Анализ других экспериментальных исследований низкоароматичных компонентов товарных бензинов также не дает значений, близких к значению по умолчанию (МГЭИК, 2006). Можно заключить, что данный коэффициент недостижим при расчете выбросов через низшую теплоту сгорания, так как даже в 1989 г. не использовали бензин с настолько низким содержанием ароматики. В предположении, что данное значение получено с использованием высшей теплоты сгорания, и, принимая разницу между данными параметрами в 5%, получаем, что коэффициент выбросов составляет ~72765 кгCO₂/ТДж в пересчете на НТС, что гораздо ближе к полученным расчетным и экспериментальным значениям национальных коэффициентов.

Таблица 9. Индивидуальный углеводородный и элементный составы легкого бензина гидрокрекинга, образец одного из НПЗ РФ (фракция 40-85°C), % масс

Table 9. Individual hydrocarbon and elemental compositions of light hydrocracked gasoline, sample from one of the Russian refineries (fraction 40-85°C), % w.t

Группа	Пара- фины	Изопара- фины	Арома- тика	Наф- тены	Олефины	Оксиге- наты	Итого
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	3.362	0.224	0.000	0.000	0.000	0.000	3.586
5	14.021	21.203	0.000	1.441	0.000	0.000	36.665
6	8.695	17.955	2.634	11.896	0.000	0.000	41.180
7	2.033	8.736	0.714	6.635	0.000	0.000	18.118
8	0.048	0.217	0.000	0.185	0.000	0.000	0.450
Итого	28.159	48.335	3.348	20.157	0.000	0.000	99.999
Элементный состав		Углерод	0.8426	Водород	0.1574	Кислород	0.0000

Параметры для других топлив выглядят сопоставимо, и отклонение от полученных данных может быть вызвано как некоторой погрешностью, так и изменившимися в стране технологиями производства топлив.

Заключение

Исследование опыта зарубежных работ, направленных на разработку национальных коэффициентов выбросов при сжигании жидких топлив, позволило сформировать концепцию НИР и выполнить работы по анализу компонентного состава приоритетных видов жидких топлив, производимых нефтеперерабатывающими заводами Российской Федерации. Объем анализируемого рынка достаточен для всех видов жидких топлив (не менее 95%), кроме рынка судового дизельного топлива (ТМС, не менее 81%). Отметим, что качественное судовое топливо (бункерованное ТМС) производится крупными НПЗ, попадающими в область исследования.

Выявлен основной параметр, влияющий на содержание углерода в топливах – объем производства различных компонентов исследуемых нефтепродуктов, из которых впоследствии формируется состав товарных марок жидких топлив.

Результат анализа показал, что коэффициенты выбросов CO₂, выраженные в натуральных единицах (кгCO₂/кг топлива), для автомобильного бензина стран Приложения 1, использующих национальные коэффициенты, выше, чем значения, приведенные по умолчанию в Руководящих принципах (МГЭИК, 2006). При этом значение, используемое в настоящее время в Национальном кадастре РФ для оценки выбросов от сжигания бензина автотранспортом, практически совпадает с предварительным результатом, полученным в рамках выполнения НИР (72920 и 73468 кг CO₂/ТДж).

Несмотря на то, что по авиационному керосину, в рамках НИР получено более высокое среднее значение коэффициента выбросов, чем значение, используемое сейчас в Национальном кадастре, результаты работы могут быть использованы для оценки углеродного следа авиационного керосина, произведенного в России, и разработки методик климатических проектов по сокращению углеродного следа для сертификации низко-углеродного авиационного керосина, в том числе в рамках международной программы CORSIA¹⁰⁾.

Коэффициенты выбросов по умолчанию для жидких топлив, приведенные в Руководящих принципах (МГЭИК, 2006), основаны на устаревших литературных источниках и требуют актуализации. В ходе дальнейшей работы в рамках ВИП ГЗ по данному направлению планируется выйти с этим вопросом на Целевую группу по национальным инвентаризациям парниковых газов (The Task Force on National Greenhouse Gas Inventories, TFI).

В целом внедрение национальных коэффициентов выбросов CO₂ от сжигания жидких топлив приводит к увеличению чувствительности Национального кадастра от изменения экологического класса и состава используемых в России топлив. Наблюдается также снижение расчетных оценок выбросов в последнее десятилетие и увеличение дельты сокращения выбросов в последние годы по сравнению 1990 годом.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 г. №3240-р «Об утверждении инновационного проекта «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ», в ходе реализации научно-исследовательской работы по теме «Проведение исследования компонентного состава приоритетных видов жидкого топлива».

Список литературы

Ахметов, А.С., Сериков, Т.П., Кузеев, И.Р., Баязитов, М.И. (2006) *Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа*, СПб, Недра, 868 с.

Белоусов, В.Н., Смородин, С.Н., Смирнова, О.С. (2011) *Топливо и теория горения*, ч. I, Топливо: учебное пособие, СПб, ГТУРП, 84 с.

ГОСТ 21261-2021 (2021) *Нефтепродукты. Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания*, введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2021 г. № 1664-ст.

¹⁰⁾ Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx> (дата обращения: 07.12.2023)

ГОСТ 10585-2013 (2013) *Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия*, введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 1868-ст.

ГОСТ ИСО 22854-2015 (2020) *Определение группового содержания углеводов и кислородсодержащих соединений в автомобильном бензине и автомобильном этанольном топливе (Е85) методом многомерной газовой хроматографии*, М., Стандартинформ, 24 с.

Ершов, М.А., Емельянов, В.Е. (2015) *Автомобильный бензин: концепция развития производства в России*, *Деловой журнал Neftegaz RU*, № 4, с. 18-23.

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

Имашева, М.У. (2016) *Исследование углеводородного состава газойлей вторичного происхождения с целью вовлечения их в композиции дизельных топлив*, Дисс. канд. техн. наук, УГНТУ, Уфа, 107 с.

Капустин, В.М., Гуреев, А.А. (2015) *Технология переработки нефти. В 4-х частях. Часть вторая. Физико-химические процессы*, М., Химия, 400 с.

Капустин, В.М., Карпов, С.А., Царев, А.В. (2011) *Оксигенаты в автомобильных бензинах*, М., КолосС, 336 с.

Коломиец, П.В. (2011) *Топливо: учебное пособие по дисциплине «Химмотология» для подготовки магистров по направлению 140500.68 «Энергостроительство», магистерская программа 140506 «Поршневые и комбинированные двигатели»*, Тольятти, ТГУ, 78 с.

МГЭИК (2006) *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. в 5-ти томах*, Подготовлено Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов, Игглестон Х.С., Буэндиа Л., Мива К., Нгара Т. и Танабе К. (редакторы), ИГЕС, Япония.

МГЭИК (1996) *Пересмотренные Руководящие принципы МГЭИК 1996 года для национальных инвентаризаций парниковых газов, 1996 в 3-х томах*, URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/nrgusn.html> (дата обращения 05.04.2024).

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

Нефтегаз (2017) *Отечественные присадки для ЕВРО-5*, URL: <https://neftegaz.ru/science/chemistry/331513-otechestvennye-prisadki-dlya-evro-5-opyt-podbor-a-i-rezultaty-ispytaniya-pri-proizvodstve-dizelnogo-t/> (дата обращения 05.04.2024).

Перечень стандартов к ТР ТС 013/2011 (2011) *О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту*, URL: <https://www.novotest.ru/informat-siya/standarts-tr-ts/013/> (дата обращения 05.04.2024).

Сорокина, А.С. (2021) *Новый подход к прогнозированию эксплуатационных свойств топливных композиций на примере дизельных топлив разного углеводородного состава*, Дисс. канд. техн. наук, РГУ нефти и газа им. Губкина, М., 139 с.

Справочная платформа ЭлектроТехИнфо Eti.su (2018) *Топливо и его сжигание. Состав, расчет горения топлива*, URL: https://eti.su/articles/sprav-ochnik/spravochnik_1711.html (дата обращения 05.04.2024).

Статистика нефтяного комплекса (2022) Министерство энергетики РФ, URL: <http://minenergo.gov.ru/activity/oilgas/> (дата обращения 05.04.2024).

Технический регламент Таможенного союза (2011) *О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту*, Утвержден Решением комиссии таможенного союза от 18 октября 2011 г. № 826, 22 с.

Федеральная таможенная служба (2017-2024) *Справочные и аналитические материалы*, URL: <https://customs.gov.ru/statistic> (дата обращения 05.04.2024).

ЦДУ ТЭК (2022) *Центральное диспетчерское управление топливно-энергетического комплекса – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России*, URL: <https://www.cdu.ru/catalog/statistic/> (дата обращения 05.04.2024).

Чузлов, В.А. (2018) *Совершенствование процесса изомеризации прямогонных бензиновых фракций на стадиях каталитического превращения и ректификации*, Дисс. канд. техн. наук, Томск, ТПУ, 160 с.

Шакун, А.Н., Федорова, М.Л., Карпенко, Т.В., Демидова, Е.В. (2020) Развитие процессов изомеризации парафиновых углеводородов, *Мир нефтепродуктов*, № 6, с. 6-14.

ARR2020_RUS (2020) *Report on the individual review of the annual submission of the Russian Federation submitted in 2020*, URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/arr2020_RUS.pdf (accessed: 07.12.2023).

CO₂ Emission Factors for Fossil Fuels (2016) URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/co2-emission-factors-for-fossil-fuels> (accessed 07.12.2023).

CO₂ Emission Factors for Fossil Fuels (2022) URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/co2-emission-factors-for-fossil-fuels-0> (accessed 07.12.2023).

DGMK 502-1 (2001-2002) *Fachausschuss Kraftstoffe Zusammensetzung von Ottokraftstoffen aus deutschen Raffinerien – Winterware 2001/2002*, URL: <https://>

dgmk.de/publikationen/zusammensetzung-von-ottokraftstoffen-aus-deutschen-raffinerien-winterware-2001-2002/ (accessed 07.12.2023).

DGMK 583 (2002) *Technical Committee Automotive Fuels Composition of Diesel Fuels from German Refineries*, URL: <https://dgmk.de/en/publications/composition-of-diesel-fuels-from-german-refineries/> (accessed 12.2023).

DGMK 821 (2019-2021) *DGMK-Project Analytics Composition of Diesel Fuels 2019/2020*, URL: <https://dgmk.de/projekte/zusammensetzung-von-dieselskraftstoffen-2019-2020/> (accessed 07.12.2023).

DGMK 879 (2022-2023) *DGMK-Project Automotive Fuels Composition of Gasoline from German Refineries Winter Product 2022/2023*, URL: <https://dgmk.de/en/projects/composition-of-oil-fuels-from-german-refineries-winter-products-2022-2023/> (accessed 07.12.2023).

DIN EN 14517 (2004) *Liquid Petroleum Products – Determination of Hydrocarbon Types and Oxygenates in Petrol – Multidimensional Gas Chromatography Method*, URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/295a2eb1-0d79-43f5-b788-59ecc8e395e3/en-14517-2004> (accessed 07.12.2023).

EFDB (2022) *EFDB – Emission Factors Database*, URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php> (accessed 05.04.2024).

EFDB Other (2022) *Other Databases*, URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/otherdb.php> (accessed 20.11.2022).

Environment and Climate Change Canada (2017) *Updated CO₂ Emission Factors for Gasoline and Diesel Fuel*, Unpublished report. Prepared by S. Tobin, Pollutant Inventories and Reporting Division, Environment and Climate Change Canada, Gatineau (QC), URL: <https://publications.gc.ca/site/eng/search/browseSerialPublications.html?st=3&oi=4015> (accessed 05.04.2024).

Grubb, M.J. (1989) On coefficients for determining greenhouse gas emissions from fossil fuel production and consumption, *Energy Technologies for Reducing Emissions of Greenhouse Gases, Proceedings of an Experts' Seminar*, OECD, Paris, pp. 537-556.

IEA/OECD (1989) *On Coefficients for Determining Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuel Production and Consumption*, Energy and Environmental Program, Royal Institute of International Affairs, London, UK, Prepared for IEA/OECD Expert Seminar on Energy Technologies for Reducing Emissions of Greenhouse Gases, Paris, France.

ISO 8217: 2017 (2017) *Petroleum Products Fuels (class F). Specifications of Marine Fuels*, URL: <https://www.iso.org/standard/64247.html> (accessed 07.12.2023).

Šindelářová, L., Ngoc Luu, E., Vozka, P. (2022) Comparison of Gas and Kerosene Oils Chemical Composition Before and After Hydrotreating Using Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography, *Journal of Chromatography*, vol. 2, November, 100068.

NIR Australia (2022) *Australia. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/478957> (accessed 05.04.2024).

NIR Canada (2022) *Canada. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461919> (accessed 05.04.2024).

NIR Germany (2022) *Germany. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461930> (accessed 07.12.2023).

NIR Italy (2022) *Italy. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461788> (accessed 05.04.2024).

NIR Japan (2022) *Japan. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461933> (accessed 05.04.2024).

NIR Netherlands (2022) *Netherlands. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461906> (accessed 05.04.2024).

NIR New Zealand (2022) *New Zealand. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461878> (accessed 05.04.2024).

NIR United States (2022) *United States of America. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461948> (accessed 05.04.2024).

References

Akhmetov, A.S., Serikov, T.P., Kuzeev, I.R., Bayazitov, M.I. (2006) *Tekhnologiya i oborudovanie protsessov pererabotki nefti i gaza* [Technology and Equipment of Oil and Gas Refining Processes], Nedra, Saint Petersburg, Russia, 868 p.

Belousov, V.N., Smorodin, S.N., Smirnova, O.S. (2011) *Toplivo i teoriya gorennya. Ch.I. Toplivo: uchebnoe posobie* [Fuel and Combustion Theory. Part I. Fuel: Textbook], GTURP, Saint Petersburg, Russia, 84 p.

GOST 21261-2021 (2021) *Nefteprodukty. Metod opredeleniya vysshei teploty sgoraniya i vychislenie nizshei teploty sgoraniya* [Petroleum Products. Method of Determination of the Higher Heat of Combustion and Calculation of the Lower Heat of Combustion], Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, Moscow, Russia.

GOST 10585-2013 (2013) *Toplivo neftyanoye. Mazut. Tekhnicheskie usloviya* [Petroleum Fuel. Fuel Oil. Technical Conditions], Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, Moscow, Russia.

GOST ISO 22854-2015 (2020) *Opredelenie gruppovogo sodержaniya uglevodorodov i kislorodsoderzhashchikh soyedinenii v avtomobil'nom benzine i avtomobil'nom etanol'nom toplive (E85) metodom mnogomernoi gazovoi khromatografii* [Determination of Group Content of Hydrocarbons and Oxygen-Containing Compounds in Motor Gasoline and Automotive Ethanol Fuel (E85) by Multidimensional Gas Chromatography], Standartinform, Moscow, Russia, 24 p.

Ershov, M.A., Emelyanov, V.E. (2015) *Avtomobil'nyi benzin: kontseptsiya razvitiya proizvodstva v Rossii* [Automobile Gasoline: The Concept of Production Development in Russia], *Neftegaz.RU*, no. 4, pp. 18-23.

Ershov, M.A., Savelenko, V.D., Lyadov, A.S., Makhova, U.A., Kapustin, V.M., Ginzburg, V.A., Lytov, V.M., Zelenova, M.S., Safronov, E.M. (2024) *Skol'ko ugleroda v rossiiskikh benzinakh i aviatoplivakh?* [How Much Carbon in Russian Gasoline and Jet Fuel?], *Neftegazovaya Vertikal*, no. 3, pp. 84-93.

Imasheva, M.U. (2016) *Issledovanie uglevodorodnogo sostava gazoyleĭ vtorichnogo proiskhozhdeniya s tsel'yu vovlecheniya ikh v kompozitsii dizel'nykh topliv* [Research of Hydrocarbon Composition of Gas Oils of Secondary Origin for the Purpose of Their Involvement in Diesel Fuel Compositions], Candidate's thesis, UGNTU, Ufa, Russia, 107 p.

Kapustin, V.M., Gureev, A.A. (2015) *Tekhnologiya pererabotki nefti. V 4-kh chastyakh. Chast' vtoraya. Fiziko-khimicheskie protsessy* [Technology of Oil Refining. In 4 Parts. Part Two. Physico-Chemical Processes], Khimiya, Moscow, Russia, 400 p.

Kapustin, V.M., Karpov, S.A., Tsarev, A.V. (2011) *Oksigenaty v avtomobil'nykh benzina* [Oxygenates in Automobile Gasoline], KolosS, Moscow, Russia, 336 p.

Kolomiets, P.V. (2011) *Toplivo: uchebnoe posobie po distsipline "Khimotologiya" dlya podgotovki magistrav po napravleniyu 140500.68 "Energomashinostroyeniye", masterskaya programma 140506 "Porshnevyye i kombinirovannyye dvigateli"* [Fuel: Textbook on the Discipline "Chemotology" for the Training of Masters in the Direction 140500.68 "Power Engineering", Master's Program 140506 "Piston and Combined Engines"], Togliatti State University, Togliatti, Russia, 78 p.

IPCC (2006) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, in 5 Volumes, Prepared by the IPCC National Greenhouse Gas Inventories Program, in Iggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. (eds.), IGES, Japan.

IPCC (1996) *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, in 3 Volumes, URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/nrgusun.html> (accessed 05.04.2024).

NDK (2023) *Natsional'nyy doklad o kadastr antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruyemykh Monrealskim protokolom za 1990-2021 gg. v 2 tomah* [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions by Sources and Absorption by Sinks of Greenhouse Gases Not Controlled by the Montreal Protocol for 1990-2021 in 2 Volumes], Moscow, Russia.

Neftegaz (2017) *Otechestvennyye prisadki dlya EVRO-5* [Domestic Additives for EURO-5], URL: <https://neftgaz.ru/science/petrochemistry/331513-otechestvennyye-prisadki-dlya-evro-5-opyt-podbora-i-rezultaty-ispytaniya-pri-proizvodstve-dizelnogo-t/> (accessed 05.04.2024).

Perechen' standartov k TR TS 013/2011 (2011) *O trebovaniyakh k avtomobil'nomu i avia tsionnomu benzinu, dizel'nomu i sudovomu toplivu, toplivu dlya reaktivnykh dvigatelei i mazutu* [List of Standards to TR CU 013/2011 "On Requirements for Motor and Aviation Gasoline, Diesel and Marine Fuel, Jet Fuel and Fuel Oil"], URL: <https://www.novotest.ru/informatsiya/standarts-tr-ts/013/> (accessed 05.04.2024).

Sorokina, A.S. (2021) *Novyy podkhod k prognozirovaniyu ekspluatatsionnykh svoystv toplivnykh kompozitsiy na primere dizel'nykh topliv raznogo uglevodorodnogo sostava* [A New Approach to Predicting the Operational Properties of Fuel Compositions Using the Example of Diesel Fuels of Various Hydrocarbon Compositions], Candidate's thesis, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia, 139 p.

Spravochnaya platforma ElektroTekhInfo Eti.su (2018) *Toplivo i ego sgoranie. Sostav, raschet goreniya topliva* [Fuel and Its Combustion. Composition, Calculation of Fuel Combustion], URL: https://eti.su/articles/spravochnik/sprav-ochnik_1711.html (accessed 05.04.2024).

Statistics of the Oil Complex (2022) Ministerstvo energetiki RF [Ministry of Energy of the Russian Federation], URL: <http://minenergo.gov.ru/activity/oilgas/> (accessed 05.04.2024).

Technical Regulations of the Customs Union (2011) *O trebovaniyakh k avtomobil'nomu i aviatsionnomu benzinu, dizel'nomu i sudovomu toplivu, toplivu dlya reaktivnykh dvigatelei i mazutu* [On Requirements for Motor and Aviation Gasoline, Diesel and Marine Fuel, Jet Fuel and Fuel Oil], Approved by the Decision of the Customs Union Commission of October 18, 2011, no. 826, 22 p.

Federal Customs Service (2017-2024) *Spravochnyye i analiticheskiye materialy* [Reference and Analytical Materials], URL: <https://customs.gov.ru/statistic> (accessed 05.04.2024).

CDU TEK (2022) *Tsentral'noye dispecherskoye upravleniye toplivno-energeticheskogo kompleksa – filial FGUP "REA" Minenergo Rossii* [Central Dispatch Administration of the Fuel and Energy Complex – Branch of the Federal State Unitary Enterprise "REA" of the Ministry of Energy of Russia], URL: <https://www.cdu.ru/catalog/statistic/> (accessed 05.04.2024).

Chuzlov, V.A. (2018) *Sovershenstvovanie protsessa izomerizatsii pryamogonnykh benzinovykh fraktsiy na stadiyakh kataliticheskogo prevrashcheniya i rektifikatsii* [Improvement of the Isomerization Process of Straight-Run Gasoline Fractions at the Stages of Catalytic Conversion and Rectification], Candidate's thesis, TPU, Tomsk, Russia, 160 p.

Shakun, A.N., Fedorova, M.L., Karpenko, T.V., Demidova, E.V. (2020) *Razvitie protsessov izomerizatsii parafinovykh uglevodorodov* [Development of Isomerization Processes of Paraffin Hydrocarbons], *Mir nefteproduktov*, no. 6, pp. 6-14.

ARR2020_RUS (2020) *Report on the individual review of the annual submission of the Russian Federation submitted in 2020*, URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/arr2020_RUS.pdf (accessed: 07.12.2023).

CO₂ Emission Factors for Fossil Fuels (2016) URL: <https://www.umwelt-bundesamt.de/en/publikationen/co2-emission-factors-for-fossil-fuels> (accessed 07.12.2023).

CO₂ Emission Factors for Fossil Fuels (2022) URL: <https://www.umwelt-bundesamt.de/en/publikationen/co2-emission-factors-for-fossil-fuels-0> (accessed 07.12.2023).

DGMK 502-1 (2001-2002) *Fachausschuss Kraftstoffe Zusammensetzung von Ottokraftstoffen aus deutschen Raffinerien – Winterware 2001/2002*, URL: <https://dgmk.de/publikationen/zusammensetzung-von-ottokraftstoffen-aus-deutschen-raffinerien-winterware-2001-2002/> (accessed 07.12.2023).

DGMK 583 (2002) *Technical Committee Automotive Fuels Composition of Diesel Fuels from German Refineries*, URL: <https://dgmk.de/en/publications/composition-of-diesel-fuels-from-german-refineries/> (accessed 12.2023).

DGMK 821 (2019-2021) *DGMK-Project Analytics Composition of Diesel Fuels 2019/2020*, URL: <https://dgmk.de/projekte/zusammensetzung-von-dieselskraftstoffen-2019-2020/> (accessed 07.12.2023).

DGMK 879 (2022-2023) *DGMK-Project Automotive Fuels Composition of Gasoline from German Refineries Winter Product 2022/2023*, URL: <https://dgmk.de/en/projects/composition-of-oil-fuels-from-german-refineries-winter-products-2022-2023/> (accessed 07.12.2023).

DIN EN 14517 (2004) *Liquid Petroleum Products – Determination of Hydrocarbon Types and Oxygenates in Petrol – Multidimensional Gas Chromatography Method*, URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/295a2eb1-0d79-43f5-b788-59ecc8e395e3/en-14517-2004> (accessed 07.12.2023).

EFDB (2022) *EFDB – Emission Factors Database*, URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php> (accessed 05.04.2024).

EFDB Other (2022) *Other Databases*, URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/otherdb.php> (accessed 20.11.2022).

Environment and Climate Change Canada (2017) *Updated CO₂ Emission Factors for Gasoline and Diesel Fuel*, Unpublished report. Prepared by S. Tobin, Pollutant Inventories and Reporting Division, Environment and Climate Change Canada, Gatineau (QC), URL: <https://publications.gc.ca/site/eng/search/browseSerialPublications.html?st=3&oi=4015> (accessed 05.04.2024).

Grubb, M.J. (1989) On coefficients for determining greenhouse gas emissions from fossil fuel production and consumption, *Energy Technologies for Reducing Emissions of Greenhouse Gases, Proceedings of an Experts' Seminar*, OECD, Paris, pp. 537-556.

IEA/OECD (1989) *On Coefficients for Determining Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuel Production and Consumption*, Energy and Environmental Program, Royal Institute of International Affairs, London, UK, Prepared for IEA/OECD Expert Seminar on Energy Technologies for Reducing Emissions of Greenhouse Gases, Paris, France.

ISO 8217: 2017 (2017) *Petroleum Products Fuels (class F). Specifications of Marine Fuels*, URL: <https://www.iso.org/standard/64247.html> (accessed 07.12.2023).

Šindelářová, L., Ngoc Luu, E., Vozka, P. (2022) Comparison of Gas and Kerosene Oils Chemical Composition Before and After Hydrotreating Using Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography, *Journal of Chromatography*, vol. 2, November, 100068.

NIR Australia (2022) *Australia. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/478957> (accessed 05.04.2024).

NIR Canada (2022) *Canada. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461919> (accessed 05.04.2024).

NIR Germany (2022) *Germany. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461930> (accessed 07.12.2023).

NIR Italy (2022) *Italy. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461788> (accessed 05.04.2024).

NIR Japan (2022) *Japan. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461933> (accessed 05.04.2024).

NIR Netherlands (2022) *Netherlands. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461906> (accessed 05.04.2024).

NIR New Zealand (2022) *New Zealand. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461878> (accessed 05.04.2024).

NIR United States (2022) *United States of America. 2022 National Inventory Report (NIR)*, URL: <https://unfccc.int/documents/461948> (accessed 05.04.2024).

Поступила в редакцию: 13.12.2023.

Доработана после рецензирования: 5.04.2024.

Для цитирования / For citation:

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

Zelenova, M.S., Lytov, V.M., Ginzburg, V.A., Savelenko, V.D., Starostin, A.A., Ershov, M.A., Lyadov, A.S., Zainulin, S.M. (2024) Development of country specific CO₂ emission factors from liquid fuel combustion for the national GHG inventory of the Russian Federation, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXV, no. 1-2, pp. 30-61, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-30-61.

**Анализ подходов к разработке коэффициентов выбросов
парниковых газов от добычи и подготовки
нефти и газового конденсата**

Н.В. Попов, О.С. Третьяк*

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

*Адрес для переписки: nikitappv@igce.ru

Реферат. Летучие выбросы парниковых газов от добычи и подготовки нефти и газового конденсата в РФ составляют примерно 2% от общего количества антропогенных выбросов парниковых газов. Категория выбросов от добычи и подготовки нефти и газового конденсата является ключевой в Национальном докладе о кадастре выбросов парниковых газов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом. Для оценки описанной категории применяется среднее значение из диапазона параметров, указанных для развитых стран в Руководящих принципах МГЭИК 2006 г. В данном диапазоне максимальное значение в 2000 раз больше минимального, что обуславливает необходимость разработки более точных национальных коэффициентов выбросов. Были проанализированы 3 подхода к разработке национального коэффициента выбросов: первый – с использованием данных о технологических потерях попутного нефтяного газа, второй – с использованием данных о газовом факторе месторождений РФ и третий – с использованием информации о выбросах метана как загрязняющего вещества на месторождениях. По результатам анализа было обнаружено, что использование первых двух подходов сильно снизит текущие значения выбросов парниковых газов, в то время как удельные коэффициенты, полученные с использованием третьего подхода наиболее близки по своим значениям к коэффициентам выбросов, приведенных в Руководящих принципах МГЭИК 2006 г. Был сделан вывод о целесообразности использования комбинированного подхода: учитывать при разработке национального коэффициента данные о расходе попутного нефтяного газа на собственные нужды стравливания и газоотведения и технологические потери вместе с данными о выбросах метана как загрязняющего вещества на месторождениях.

Ключевые слова. Методика разработки коэффициентов выбросов, парниковые газы, выбросы при добыче нефти, выбросы при подготовке нефти, МГЭИК 2006, национальный кадастр.

**Analysis of approaches to develop greenhouse gas emission factors
from oil and gas condensate production and upgrading**

N.V. Popov, O.S. Tret'yak*

Abstract. Fugitive greenhouse gas emissions from oil and gas condensate production and treatment account for around 2% of total national anthropogenic emissions in Russia. The oil and gas condensate production and treatment emissions category is the key category in National inventory report on greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol. For greenhouse gas emissions accounting in this category the average value from the range of parameters specified for developed countries in the IPCC 2006 guidelines (here in after IPCC 2006) is used. Within this range the maximum value is 2000 times higher than the minimum value, which is the reason why more accurate national emission factors should be developed. There were 3 approaches to develop greenhouse gas national emission factors which was analyzed: first – with use of associated petroleum gas technical losses data, second – with use of gas/oil ratio factors on oil and gas field of Russia, and third – with use of data of methane emissions on fields as a pollutant. According to the results of the analysis it was found that use of first two approaches will strongly reduce current emission estimates from observed category, while emission factors obtained with use of third approach are the closest to IPCC 2006 emission factor values. There where made a conclusion that is reasonable to use combined approach to develop national emission factors: account for associated petroleum gas use on field own needs for venting and technical losses together with methane as a pollutant emission on fields data.

Keywords. Emission factor methodology, greenhouse gases, greenhouse gas emission from oil production, greenhouse gas emission from oil treatment, IPCC 2006, national inventory report.

Введение

В настоящее время в Национальном кадастре (НДК, 2023) наибольший вклад от общего количества выбросов парниковых газов (ПГ) составляют выбросы в секторе «Энергетика» (приблизительно 80%). Сектор «Энергетика» включает выбросы, происходящие от сжигания топлива с целью получения энергии и тепла (подсектор 1.A) и летучие, или фугитивные выбросы (подсектор 1.B), составляющие 86 и 14 % соответственно. Категория выбросов метана и диоксида углерода при операциях с нефтью в подсекторе «Фугитивные выбросы» является одной из ключевых в Национальном кадастре, основными источниками выбросов в ней являются выбросы от разведки (бурения, опробования и обслуживания), добычи и подготовки нефти и газового конденсата (НДК, 2023).

На рис. 1 приведено распределение общего выброса парниковых газов по секторам и относительный вклад суммарных выбросов ПГ от операций по разведке, добыче и подготовке нефти в национальный выброс парниковых

газов без учёта сектора «Землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство» (ЗИЗЛХ).

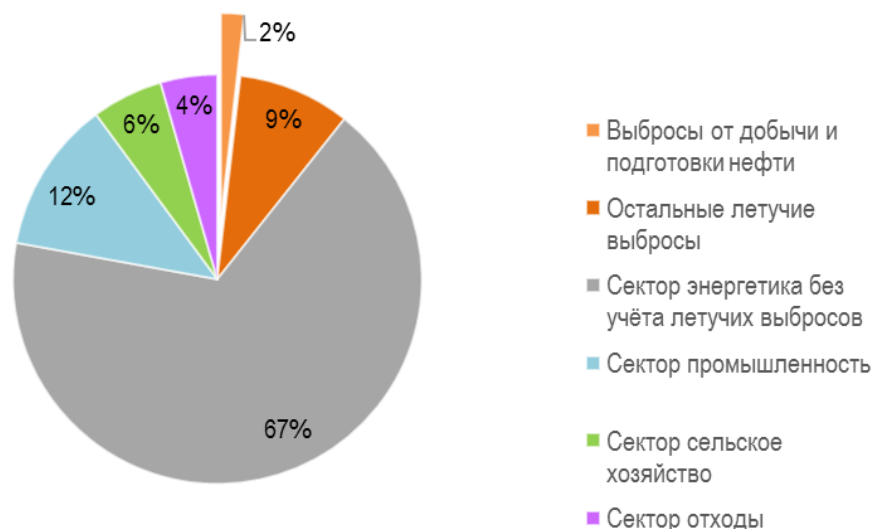


Рисунок 1. Относительный вклад выбросов парниковых газов от операций по добыче и подготовке нефти в суммарные эмиссии приведённые в национальном кадастре

Figure 1. Relative contribution of greenhouse gas emissions from oil and gas condensate production and upgrading operations in to summarized emissions included in national inventory report

Из рисунка видно, что вклад выбросов от операций по добыче и подготовке нефти и газового конденсата составляет почти 2% от общего количества выбросов в Национальном кадастре без учёта сектора ЗИЗЛХ.

Для оценки выбросов метана от добычи и подготовки нефти и газового конденсата в Национальном кадастре были использованы коэффициенты, указанные в табл. 4.2.4 тома 2 главы 4 Руководящих принципов МГЭИК 2006 г. (МГЭИК, 2006). В указанной таблице приведён диапазон коэффициента выбросов метана, который возможно применять при оценке выбросов от рассматриваемой категории в развитых странах: он составляет от 1.5×10^{-6} до 3.6×10^{-3} Гг CH_4 на тыс. м^3 добычи нефти и газового конденсата. Максимальное значение коэффициента из указанного диапазона более чем в 2000 раз больше минимального значения. В качестве источника данных параметров в МГЭИК 2006 приведены источники 1996, 1999, и 2004 гг. В Национальном кадастре использовано среднее значение из указанного диапазона (НДК, 2023). Можно предположить, что применяемый в Национальном кадастре коэффициент может не релевантно отображать фактический уровень выбросов парниковых газов в CO_2 эквиваленте от добычи и подготовки нефти и газового конденсата. Начиная с 2012 г., нефтегазовыми компаниями России стали активно внедряться инвестиционные газовые программы по утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) – основного углеводородного сырья, выбрасываемого в атмосферу при добыче и подготовке нефти (Отчёт об устойчивом развитии, 2023). Также, начиная с 2015 г., нефтегазовыми компаниями

активно внедряются низкоуглеродные стратегии развития на предприятиях, что способствует снижению выбросов парниковых газов.

Учитывая выше сказанное, можно сказать, что существует достаточно оснований для обновления коэффициента выброса метана от добычи и подготовки нефти и газового конденсата. Данную работу предполагается выполнить в рамках Важнейшего инновационного проекта государственного значения (далее – ВИП ГЗ).

Для выполнения выше указанной работы необходимо сделать предварительный анализ возможных подходов к разработке указанного коэффициента с целью выбора наиболее оптимальной методики его расчёта. Анализ каждой методики требует приблизительной оценки выбросов метана и их сопоставление с выбросами, приведёнными в Национальном кадастре.

Методы и материалы

Был проведён анализ трёх подходов к определению коэффициентов выбросов метана и диоксида углерода от добычи и подготовки нефти и газового конденсата за 2020 и 2021 г.:

1. Расчёт коэффициентов с использованием, регулярных статистических данных о технологических потерях ПНГ и нефти за год.
2. Расчёт коэффициентов выбросов с использованием газового фактора нефтедобывающих месторождений.
3. Расчёт коэффициентов выбросов с использованием статистики по выбросам метана как загрязняющего вещества на нефтедобывающих месторождениях

Для анализа каждого подхода проводился расчёт предварительных величин коэффициентов выбросов за 2020 и 2021 г. и их сопоставление с используемыми в настоящее время в кадастре коэффициентами выбросов метана и диоксида углерода от добычи и подготовки нефти и газового конденсата, которые приведены в таблице 4.2.4 тома 2 главы 4 МГЭИК 2006, в категориях 1.B.2.a.iii.2 (утечки для суши) и 1.B.2.a.i.

Первый подход

В анализе метода расчёта коэффициента с использованием технологических потерь использовалась формула 3.1 Приказа Минприроды России от 27.05.2022 N 371 "Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов" (Приказ, 2022), где « $FC_{j,y}$ » было заменено на технологические потери ПНГ за год в тыс. м³.

Итоговые выбросы CO₂ и CH₄ были поделены на объёмы добычи нефти за 2020 г. и 2021 г. для сравнения с коэффициентами выбросов и оценками эмиссий, согласно МГЭИК 2006.

Второй подход

Анализ второго подхода производился с использованием формулы 1 (МГЭИК, 2006).

$$E_{\text{газ, доб. нефти, удаление}} = GOR \times Q_{\text{нефть}} \times (1 - CE) \times (1 - X_{\text{Сож. в факелах}}) \times \quad (1) \\ \times M_{\text{газ}} \times y_{\text{газ}} \times 42.3 \times 10^{-6}$$

где: $E_{\text{газ, доб. нефти, удаление}}$ – прямое количество (Гг/год) парникового газа i , поступившего в атмосферу при продувках, стравливаниях и удалении, или газоотведении на объектах нефтедобычи;

GOR (*gas to oil ratio*) – газовый фактор нефтедобывающих месторождений;

$Q_{\text{НЕФТЬ}}$ – объёмы добычи нефти;

CE – коэффициент, или уровень утилизации ПНГ на месторождении;

$X_{\text{Сож. в факелах}}$ – доля из общего объёма нерационального утилизированного ПНГ, которая была сожжена в факелах, а не выпущена в атмосферу (включая стравливание и рассеяние);

$M_{\text{газ}}$ – молекулярный вес интересующего газа (например, 16.043 для CH_4 и 44.011 для CO_2);

$y_{\text{газ}}$ – объемная доля попутного газа состоящего из вещества i (например, CH_4 , CO_2 или ЛНОС).

Итоговые выбросы CO_2 и CH_4 были поделены на объёмы добычи нефти за 2020 г. и 2021 г. для сравнения с коэффициентами выбросов и оценками эмиссий, согласно МГЭИК 2006.

Третий подход

Анализ третьего подхода производился с использованием статистики по выбросам метана из общего реестра объектов негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) Росприроднадзора (Государственный реестр объектов..., 2023). Для оценки выбросов были отобраны несколько месторождений: Самотлорское, Ванкорское, Русское, Восточно-Таркосалинское, Ярудейское. По выборке месторождений была собрана статистика по суммарным выбросам метана на разных объектах, площадках, цехах и др. Полученные суммарные оценки выбросов метана (в тоннах) были отнесены к добыче нефти (формула 2) за 2020 и 2021 гг. и сопоставлены с коэффициентами выбросов и оценками эмиссий, согласно МГЭИК 2006.

$$EF_{\text{CH}_4, y} = \frac{E_{\text{CH}_4, y}}{V_{\text{доб. нефти, y}}}; \quad (2)$$

где: $EF_{\text{CH}_4, y}$ – выбросы метана за период y , тыс. т/тыс. м³;

$E_{\text{CH}_4, y}$ – выбросы метана за период y , тыс. т;

$V_{\text{доб. нефти, y}}$ – объём добычи нефти за период y , тыс. м³

Результаты

Первый подход

Результаты анализа первого подхода приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты анализа подхода по расчёту выбросов парниковых газов от технологических потерь углеводородов

Table 1. Results of counting GHG emissions from hydrocarbon technical losses

Использованные параметры		
Объёмная доля CH ₄ в пластовых нефтях, %	27.85	
Объёмная доля CH ₄ в составе ПНГ, %	66.36	
Объёмная доля CO ₂ в составе ПНГ, %	0.78	
Результаты расчёта		
Год	2020 г.	2021 г.
Технологические потери ПНГ, тыс. м ³	211 080	236 202
Потери нефти при добыче всего, тыс. м ³	554 968	514 864
Выброс CH ₄ при добыче и подготовке нефти и ГК, тонн.	196873	200549
Выброс CO ₂ при добыче и подготовке нефти и ГК, тонн.	3028	3389
удельный коэффициент выбросов тыс. т CO ₂ экв/ тыс. м ³ нефти	7.99×10 ⁻³	8.97×10 ⁻³
Добыча нефти, тыс. м ³	659 466	603 652
Выброс т.CO ₂ экв/год (удел. коэффициент)	4 924 843	5 017 116
коэфф. выбросов МГЭИК (продувки) тыс. т CO ₂ экв/ тыс. м ³ нефти	1.81×10 ⁻²	
Выброс т.CO ₂ экв/год (с использованием коэфф. МГЭИК)	11 933 046	10 923 070
Отношение коэфф. МГЭИК к удельному коэффициенту	2.02	

Из табл. 1 видно, что вклад суммарных выбросов CO₂ и CH₄ (в CO₂ экв.) от продувок при добыче нефти и газового конденсата, рассчитанных с применением коэффициента выбросов от продувок МГЭИК 2006, в 2 раза больше оценок выбросов по данным о технологических потерях ПНГ. Потенциально, причиной таких расхождений могут быть завышенные значения коэффициентов МГЭИК 2006, а также недоучёт в показателе технологических потерь оценок выбросов определённых категорий эмиссий парниковых газов от утечек и газоотведения при использовании ПНГ на собственные нужды месторождения, которые не включены в объёмы технологических потерь ПНГ (МГЭИК, 2006; Методические рекомендации, 2018).

Второй подход

Был проведён расчёт с использованием двух газовых факторов 60 и 140 м³/м³, характерных для месторождений Западной Сибири (Нефтяные и газовые месторождения, 1987). Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты анализа подхода по расчёту выбросов парниковых газов с использованием газового фактора месторождений (GOR)

Table 2. Results of counting GHG emissions with use of gas/oil ratio (GOR)

Использованные параметры		
Средний газовый фактор м ³ /м ³ (GOR) 1 и 2 варианты	60/140	
Объёмная доля CH ₄ в составе ПНГ (y gas)	0.6636	
Объёмная доля CO ₂ в составе ПНГ (y gas)	0.0078	
Молек. вес CH ₄ (Mgas)	16.043	
Молек. вес CO ₂ (Mgas)	44.011	
Результаты расчёта		
Год	2019	2020
Объём сжигания ПНГ в РФ, млн м ³	20470	19320
Тех. потери ПНГ, млн. м ³	211	236
Уровень утилизации ПНГ (CE)	0.81	0.82
Отношение сжиг. ПНГ к сумме сжиг. ПНГ+ тех. потери ПНГ (X flared)	0.99	0.99
Добыча нефти, тыс. м3 (Q oil)	659 466.48	603 651.52
Выбросы CH ₄ Гг, GOR60 м ³ /м ³	34.55	35.46
Выбросы CO ₂ Гг, GOR60 м ³ /м ³	1.11	1.14
Выбросы CO2 экв тонн, GOR60 м3/м3	864 980	887 650
Выбросы CO2 экв тонн, GOR 140 м3/м3	2 018 000	2 071 000

При использовании второго метода расчёта суммарные выбросы CO₂ и CH₄ (в CO₂ экв.), полученные с применением коэффициента выбросов МГЭИК 2006, в 10 и 5 раз больше, чем оценки выбросов с использованием газовых факторов 60 и 140 м³/м³ соответственно. Можно сказать, что использование подхода с применением газового фактора резко повлияет на тренд выбросов от рассматриваемой категории.

Третий подход

Результаты анализа третьего подхода приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что, в среднем, использование данных по выбросам метана как загрязняющего вещества от добычи и подготовки нефти и газового конденсата на месторождениях наиболее близко по своим значениям к коэффициенту выбросов от утечек МГЭИК 2006. Следует отметить, что значения удельных выбросов (УВ) и их доли от коэффициентов МГЭИК 2006 меняются в зависимости от месторождений. Также, рассчитанные УВ имеют большие значения неопределённости, что может быть связано с информацией о выбросах в реестре объектов НВОС открытого доступа: в данном реестре приводятся суммарные значения выбросов метана как загрязняющего вещества от всех источников, расположенных на нефтедобывающих месторождениях в том числе и факельного сжигания. Таким образом, потенциально, вышеприве-

дённые оценки могут быть не сопоставимы с показателями утечек и продувок от добычи и подготовки нефти.

Таблица 3. Результаты анализа подхода к оценке выбросов парниковых газов с использованием данных о выбросах метана как загрязняющего вещества от нефтегазовых объектов

Table 3. Results of analysis of GHG counting method with use of methane as pollutant data

Месторождения	Самот- лорское	Ван- корское	Русское	Вос- точно- Тарско- салин- ское	Ярудейское	Среднее значение
Выброс CH ₄ как ЗВ, согласно реестру объ- ектов НВОС, тонн	37 307.00	21 811.02	9 048.12	1 508.06	2 478.99	
Добыча нефти в 2021 г., тыс.м ³	19 306	12 114	2 912	2 319	3 589	
Удельный выброс (УВ) CH ₄ , т./тыс. м ³	1.93×10 ⁻³	1.80×10 ⁻³	3.11×10 ⁻³	6.5×10 ⁻⁴	6.91×10 ⁻⁴	1.56×10 ⁻³
Доля УВ от суммы коэффициентов выбро- сов CH ₄ (утечки+про- дувки) МГЭИК	0.77	0.71	1.23	0.26	0.27	0.62
Доля УВ от общего коэффициента утечек CH ₄ МГЭИК	1.07	1.00	1.73	0.36	0.38	0.87
Доля УВ от общего коэффициента выбро- сов CH ₄ от продувок МГЭИК	2.68	2.50	4.32	0.90	0.96	2.17

Выводы

По результатам анализа были сделаны следующие выводы:

- для разработки национального коэффициента выбросов наиболее релевантными являются данные об организованных и неорганизованных выбросах метана как загрязняющего вещества на объектах добычи и подготовки нефти и газового конденсата;
- при разработке национального коэффициента может использоваться комбинированный подход, в котором учитывается сумма выбросов метана как загрязняющего вещества и выбросов метана и диоксида углерода в составе ПНГ и испарений нефти от продувок, стравливания, газоотведения, технологических потерь и утечек на месторождениях нефти (с исключением двойного учёта выбросов).

Список литературы

НДК (2023) *Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2021 гг.* Часть 1, Москва, 479 с., электронный ресурс, URL: http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR_2023_rev2.zip (дата обращения 27.12.2023).

МГЭИК (2006) *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Том 2. Энергетика*, электронный ресурс, URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol2.html> (дата обращения).

Отчёт об устойчивом развитии ПАО «НК «Роснефть» за 2020 год, электронный ресурс, URL: https://www.rosneft.ru/upload/site1/document_file/Rosneft_CSR2020_RUS.pdf; (дата обращения 16.12.2023).

Приказ (2022) *Приказ Минприроды России от 27.05.2022 N 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов»*, Электронный ресурс, URL: <https://carbonreg.ru/pdf/%D0%9E%D0%B1%D1%89%D0%B8%D0%B5%D0%9D%D0%9F%D0%90/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D0%9C%D0%B8%D0%BD%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%8B%D0%A%D0%A4%D0%BE%D1%82%2027.05.2022%20N%20371.pdf>, (дата обращения 19.12.2023).

Государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, официальный сайт Федеральной службы по надзору в сфере охраны окружающей среды (2023) электронный ресурс, URL: https://uonvos.rpn.gov.ru/rpn/pto-uonvos/onv_registry (дата обращения 28.12.2023).

Методические рекомендации (2018) *Методические рекомендации по определению и обоснованию технологических потерь природного газа, газового конденсата и попутного газа при добыче, технологически связанных с принятой схемой и технологией разработки месторождения* (утв. Министерством энергетики РФ 12 апреля 2018 г.), электронный ресурс, URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71823792/> (дата обращения 28.12.2023).

Нефтяные и газовые месторождения СССР (1987) Справочник в двух книгах. Под ред. С.П. Максимова. Книга вторая. Азиатская часть СССР. М., Недра, 303 с.

References

НДК (2023) *Nacionalniy doklad antropogennikh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovij gazov, nereguliruemij Monrealskim protokolom* [The National Report of the Russian Federation on the Inventory of the Anthropogenic Emissions and Sinks of Greenhouse Gases Not Controlled by the Montreal Protocol for the years 1990-2021 y.] Part 1, Moscow, Russia, 479 p.,

available at: http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR_2023_rev2.zip (access data 27.12.2023).

MGEIK (2006) *Rukovodiashie principy nacionalich inventarizaciy parnikovich gazov* [IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories], vol. 2, Energy sector. Web resource. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol2.htm>.

Othcet ob ustoichivom razvitii PAO «NK «Rosneft» za 2020 god [Rosneft Sustainability report for 2020 year], available at: https://www.rosneft.ru/upload/site1/document_file/Rosneft_CSR2020_RUS.pdf; (access data 16.12.2023).

Prikaz (2022) *Prikaz Minprirody Rossii ot 27.05.2022 N 371 «Ob utverzhdenii metodik kolichestvennogo opredeleniya ob"emov vybrosov parnikovyyh gazov i pogloshchenij parnikovyyh gazov»* [Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of Russia from 27.05.2022 N 371 "On Approval of Methods for Quantitative Determination of Greenhouse Gas Emissions and Greenhouse Gas Absorptions"], available at: <https://carbonreg.ru/pdf/%D0%9E%D0%B1%D1%89%D0%B8%D0%B5%20%D0%9D%D0%9F%D0%90/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D0%B7%20%D0%9C%D0%B8%D0%BD%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%8B%20%D0%A4%20%D0%BE%D1%82%2027.05.2022%20N%20371.pdf> (access data 19.12.2023).

Gosudarstvennyj reestr ob"ektov, okazyvayushchih negativnoe vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredy, oficial'nyj sayt Federal'noj sluzhby po nadzoru v sfere ohrany okruzhayushchej sredy [State Register of Objects with Negative Environmental Impact, official website of the Federal Service for Supervision of Environmental Protection], available at: https://uonvos.rpn.gov.ru/rpn/pto-uonvos/onv_registry (access data 28.12.2023).

Metodicheskie rekomendacii (2018) *Metodicheskie rekomendacii po opredeleniyu i obosnovaniyu tekhnologicheskikh poter' prirodnogo gaza, gazovogo kondensata i poputnogo gaza pri dobyche, tekhnologicheski svyazannyh s prinyatoj skhemoj i tekhnologiej razrabotki mestorozhdeniya (utv. Ministerstvom energetiki RF 12 aprelya 2018 g.)* [Methodological Recommendations for Determination and Justification of Technological Losses of Natural Gas, Gas Condensate and Associated Gas during Production Technologically Related to the Adopted Field Development Scheme and Technology (approved by the Ministry of Energy of the Russian Federation on April 12, 2018)], available at: Webresource: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71823792/> (access data 28.12.2023).

Neftyanye i gazovye mestorozhdeniya SSSR. Spravochnik v dvuh knigah in S.P. Maksimova (ed) (1987) [USSR oil and gas field. Reference book in 2 volumes/ edited by S.P. Maksimova], «Nedra», Moscow, Russia, 303 p.

Статья поступила в редакцию (Received): 10.01.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 06.05.2024.

Для цитирования / For citation

Попов, Н.В., Третьяк, О.В. (2024) Анализ подходов к разработке коэффициентов выбросов парниковых газов от добычи и подготовки нефти и газового конденсата, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 1-2, с. 62-72, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-62-72.

Popov, N.V., Tret'yak, O.S. (2024) Analysis of approaches to develop greenhouse gas emission factors from oil and gas condensate production and upgrading, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXV, no. 1-2, с.62-72, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-62-72.

Разработка национальных коэффициентов выбросов CO₂ от производства на предприятиях Российской Федерации

*Б.М. Аникушин^{1,2)}, Э.Ю. Бакурова¹⁾, С.В. Валов^{1,2)}, А.Р. Давлетишина^{1,2)},
К.А. Заволокин^{1,2)}, Е.В. Имшенник^{1)*}, М.Х. Сосна^{1,2)}*

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

²⁾Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина,
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 65, к. 1

*Адрес для переписки: ekimsh@rambler.ru

Реферат. Предприятия нефтехимической промышленности являются существенным источником выбросов парниковых газов в Российской Федерации. Основной вклад в выбросы вносят предприятия-производители этилена, метанола и технического углерода. Уточнение оценки выбросов парниковых газов от этих источников имеет большое значение для правильной оценки выбросов парниковых газов в российском национальном кадастре выбросов и абсорбции парниковых газов. В статье на основе данных предприятий-производителей представлены результаты расчетов коэффициентов выбросов диоксида углерода от производства метанола. Коэффициенты выбросов CO₂ оцениваются по методике МГЭИК, основанной на массовом балансе углерода, введенного в производственный процесс с сырьевыми материалами и выходящего из процесса в составе нефтехимических продуктов. Полученные в результате расчета коэффициенты выбросов для отдельных предприятий зависят от используемой на предприятии технологии производства метанола и могут изменяться в широких пределах: от 0.36 т CO₂/т метанола до 1.24 т CO₂/т метанола. Для предприятий, использующих сходные технологии, полученные в ходе работы, коэффициенты выбросов имеют близкие значения. Среднеквадратичное отклонение от средних значений коэффициентов выбросов для таких предприятий не превышает 10%. Национальные коэффициенты выбросов рассчитывались для 1995, 2000, 2005, 2010, 2015-2022 гг. как средневзвешенное по производству метанола значение коэффициентов выбросов отдельных предприятий. За период с 1995 г. по 2020 г. национальный коэффициент выбросов CO₂ от производства метанола существенно (на 25-27%) снизился с 0.801 т CO₂/т метанола до 0.585-0.598 т CO₂/т метанола. Снижение выбросов CO₂ от производства метанола связано с модернизацией существующих предприятий и строительством новых производств, использующих современные технологии. При отсутствии существенных изменений в отрасли, связанных с вводом новых мощностей по производству метанола, модернизацией и закрытием старых, средний коэффициент выбросов CO₂ за

2020-2022 гг., равный 0.59 т CO₂/т метанола, может быть использован для оценки выбросов от производства метанола в стране в ближайшие годы.

Ключевые слова. Нефтехимическая промышленность, производство метанола, выбросы парниковых газов, диоксид углерода.

Developing of national CO₂ emission factors from methanol production at the enterprises of the Russian Federation

*B.M. Anikushin^{1,2)}, E.Yu. Bakurova¹⁾, S.V. Valov^{1,2)}, A.R. Davletshina^{1,2)},
K.A. Zavolokin^{1,2)}, E.V. Imshennik¹⁾*, M.H. Sosna^{1,2)}*

¹⁾Yu. A. Israel Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., Moscow, 107258, Russian Federation

²⁾Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),
65, Leninsky prospect, Moscow, 119991, Russian Federation

*Correspondence address: ekimsh@rambler.ru

Abstract. Petrochemical industry is a significant source of greenhouse gas emissions in the Russian Federation. The main contribution to emissions comes from ethylene, methanol and carbon black production enterprises. Improvement of greenhouse gas emissions estimation from these sources is very important for the correct assessment of greenhouse gas emissions in the Russian national greenhouse gas inventory. In the article carbon dioxide emission factors from methanol production in the Russian Federation are developed. Developed emission factors are based on the data provided by the methanol producers. CO₂ emission factors are estimated using the IPCC carbon mass balance methodology, which calculates emission as difference between carbon input into the production process with feedstock and carbon leaving the process as part of petrochemical products. The calculated emission factors for individual enterprises depend on the methanol production technology used at the enterprises and can vary widely: from 0.36 t CO₂/t methanol to 1.24 t CO₂/t methanol. Enterprises using similar technologies are characterized by similar values of emission factors. The standard deviation from the average emission factor value for such enterprises does not exceed 10%. National emission factors were calculated for 1995, 2000, 2005, 2010, 2015-2022 as a methanol production-weighted average of individual plant emission factors. Over the period from 1995 to 2020, the national CO₂ emission factor from methanol industry decreased significantly (by 25-27%) from 0.801 t CO₂/t of methanol to 0.585-0.598 t CO₂/t of methanol. The reduction in CO₂ emissions from methanol production occurred as a result of the modernization of existing enterprises and the construction of new production facilities using modern technologies. In the absence of significant changes in the industry, such as introduction of new methanol production facilities, modernization and closure of

methanol can be used to estimate CO₂ emissions from methanol production in the country during next several years.

Keywords. Petrochemical industry, methanol production, greenhouse gas emissions, carbon dioxide.

Введение

В соответствии с руководством МГЭИК (IPCC, 2006) в нефтехимической промышленности оцениваются выбросы CO₂ и CH₄ от следующих источников: производство этилена, производство метанола, производство окиси этилена, производство винилхлорида, производство акрилонитрила и производство технического углерода или сажи. Оценка выбросов CO₂ в российском Национальном кадастре выбросов парниковых газов (НДК, 2023) выполнялась по методике первого уровня МГЭИК в связи с отсутствием необходимых для более точных оценок технологических данных. В РФ в 2021 г. доля выбросов парниковых газов (ПГ) от нефтехимической промышленности в совокупном выбросе ПГ без учета сектора «Землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства» составила 0.81%. В структуре выбросов от нефтехимической промышленности основным ПГ является CO₂. Его доля в выбросах в 2021 г. составила 96.4%. Выбросы CO₂ от нефтехимической промышленности являются ключевой категорией в российском Национальном кадастре выбросов парниковых газов. В связи с этим оценка выбросов CO₂ от основных источников выбросов в нефтехимической промышленности в Национальном кадастре должна быть выполнена по методике второго уровня МГЭИК, которая учитывает технологические особенности производства нефтехимических продуктов в России. Основными источниками выбросов CO₂ в нефтехимии являются производство этилена, производство метанола и производство технического углерода. Выбросы от этих источников в сумме составляют около 95% выбросов CO₂ от нефтехимической промышленности. На рис. 1 представлена структура выбросов CO₂ от нефтехимических производств в 2021 г. по данным российского Национального кадастра выбросов парниковых газов (НДК, 2023). Самым значительным источником выбросов является производство этилена, выбросы CO₂ от которого составляют 59.6% выбросов от нефтехимической промышленности. Выбросы CO₂ от производства метанола и от производства технического углерода также являются значительными и составляют соответственно 18.0% и 17.0% выбросов от нефтехимической промышленности. Значительность выбросов предполагает использование более точных методов оценки выбросов, учитывающих особенности этих производств в стране.

Настоящая работа посвящена разработке национальных коэффициентов выбросов CO₂ от производства метанола на основе данных, полученных от предприятий-производителей. Исследование выполнено в рамках проекта «Российская система климатического мониторинга» (ВИП-ГЗ) в 2023 г. и имеет целью совершенствование оценок выбросов диоксида углерода от

нефтехимической промышленности в национальном кадастре выбросов парниковых газов России.

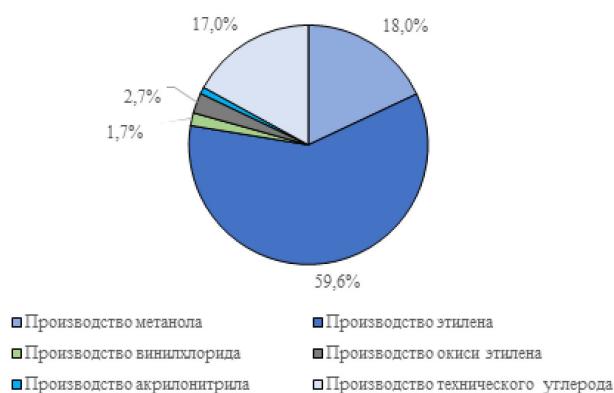


Рисунок 1. Структура выбросов CO₂ в нефтехимической промышленности в 2021 г.
(по данным НДК, 2023)

Figure 1. Structure CO₂ emissions in the petrochemical industry in 2021
(according to the NDK, 2023)

Анализ текущего состояния производства метанола. Обзор предприятий-производителей метанола

Мировая метанольная отрасль является одной из наиболее динамично развивающихся – ее рост за последние 15 лет вдвое превысил динамику мирового ВВП (более 6.5% ежегодно) (VYGON consulting, 2019). Ключевым игроком на рынке метанола является Китай, который является крупнейшим производителем и потребителем (более половины мирового потребления) метанола. Ежегодный прирост потребления метанола в Китае составляет в настоящее время 16%. Собственного производства не хватает, поэтому Китай является крупнейшим импортером этого продукта, на него приходится более трети мирового импорта. Основными производителями метанола, кроме Китая, являются США (8% мирового производства), страны Ближнего Востока (Иран, Саудовская Аравия, Оман и Катар) – 14% мирового производства. Исторически США были чистым импортером метанола, но к 2020 г. они стали его нетто-экспортером благодаря вводу в эксплуатацию новых производственных мощностей. Страны Ближнего Востока являются крупнейшими экспортерами метанола в мире. Внутреннее потребление метанола не превышает 20-25% от производства.

Россия является одним из крупнейших производителей метанола в мире. Суммарные производственные мощности составляют более 5.6 млн т/год. Объем производства метанола существенно выше уровня внутреннего спроса. 60% производимого метанола используется на внутреннем рынке, 40% – экспортируется (VYGON consulting, 2019).

В Российской Федерации девять крупных производителей метанола (Сосна и др., 2018). Четыре производителя обеспечивают более 80% выпуска метанола. Это АО «Метафракс Кемикалс» (г. Губаха, Пермский край), АО «Щекиноазот» (р/п Первомайский, Тульская область), ООО «Газпром метанол» (г. Томск) и ООО «Томет» (с. Зеленовка, Самарская область). Помимо указанных производств действуют также: АО «Ангарская нефтехимическая компания» (г. Ангарск, Иркутская область), АО «Аммоний» (г. Менделеевск, Татарстан), ПАО «Акрон» (г. Великий Новгород), АО «НАК «Азот» (г. Новомосковск, Тульская область) и АО «Невинномысский Азот» (г. Невинномысск, Ставропольский край).

Кроме того, существуют малотоннажные производства метанола ПАО «НОВАТЭК», которые в рамках настоящей работы не рассматриваются, так как их суммарные мощности оцениваются в 50 тыс. т/год, что составляет менее 1% от суммарного производства метанола в России. Производимый ПАО «НОВАТЭК» метанол в полном объеме используется в газотранспортной системе компании как ингибитор гидратообразования.

Основные российские предприятия-производители метанола, их производственная мощность, технологии и сырье, которые используются для получения метанола, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Предприятия-производители метанола в Российской Федерации

Table 1. Methanol producers in the Russian Federation

№	Название предприятия	Производственная мощность, тыс. т/год	Исходное сырье для производства метанола	Технология получения синтез газа	Лицензиар
1	АО «Щекиноазот»	1 400	Природный газ	паровая конверсия метана с предварительным риформингом (установка М-500); совместное производство аммиака и метанола, паровая и паровоздушная конверсия с предварительным риформингом (установка МиА), паровая и парокислородная конверсия метана с предварительным риформингом (установка М-450)	Haldor Topsoe, Дания
2	АО «Метафракс Кемикалс»	1 230	Природный газ	паровая конверсия метана и парциальное окисление природного газа кислородом	Johnson Matthey (ICI), Великобритания

Продолжение таблицы 1

№	Название предприятия	Производственная мощность, тыс. т/год	Исходное сырье для производства метанола	Технология получения синтез газа	Лицензиар
3	ООО «Томет»	1 000	Природный газ	пароуглекислотная конверсия метана	METHANOL CASALE S.A., Швейцария
4	ООО «Газпром метанол»	840	Природный газ	паровая конверсия природного газа	Johnson Matthey (ICI), Великобритания
5	АО «НАК «Азот»	300	Природный газ	паровая конверсия природного газа	ГНИИ «Химтехнология» (г. Северодонецк)
6	АО «Аммоний»	233.8	Природный газ	совместное производство аммиака и метанола паровая конверсия метана и вторичный риформинг (паровоздушная конверсия)	Haldor Topsøe, Дания
7	АО «Невинномысский Азот»	130	Синтез-газ от производства ацетилена	производство синтез-газа отсутствует	ГосНИИ-Метанол-проект г. Северодонецк
8	ПАО «Акрон»	110	Природный газ	нет данных	нет данных
9	АО «АНХК»	70	Продувочные и танковые газы других производств	паровая конверсия углеводородных газов	АО «Ангарск нефтехим-проект»

В России было заявлено к реализации большое количество метанольных проектов. Ожидалось, что к 2030 году в России будет реализовано шесть крупных проектов по производству метанола: АО «НЗМУ» (Приморский край, 1.8 млн т/год к 2025 г.), ГК «ЕСН» (Амурская область, 2.2 млн т/год к 2028 г.), «АЕОН» (Волгоградская область, 1.5 млн т/год к 2025 г.), два проекта на Балтике по 1.8 млн т/год каждый к 2027 г., «Аммоний-2» (Татарстан, 500 тыс. т/год к 2028 г.). Их совокупная мощность, таким образом, составила бы 9.6 млн т/год.

В настоящее время из-за внешнеполитической обстановки и санкционных ограничений заморожены все известные проекты по строительству новых производств метанола.

Разработка коэффициентов выбросов CO₂ на основе данных предприятий, анализ полученных результатов с учетом технологий производства

Коэффициенты выбросов диоксида углерода рассчитывались по методике МГЭИК, основанной на массовом балансе углерода, введенного в производственный процесс с сырьевыми материалами и выходящего из процесса в составе нефтехимических продуктов (IPCC, 2006). Методика, основанная на балансе углерода, включает допущение о том, что весь углерод, введенный в процесс, либо вошел в состав первичных или вторичных продуктов производства, либо превратился в диоксид углерода. В случае производства метанола уравнение (1) используется для расчета выбросов CO₂.

$$E_{CO_2} = (NG \cdot C_{NG} - MT \cdot C_{MT}) \cdot \frac{44}{12}, \quad (1)$$

где E_{CO_2} – выбросы CO₂ от производства метанола, тонны;
 NG – годовое потребление природного газа или другого углеродсодержащего сырья, тонны;
 MT – годовое производство метанола, тонны;
 C_{NG}, C_{MT} – содержание углерода в сырье и метаноле, т С/т сырья или метанола.

Вторичных продуктов при производстве метанола не образуется. Коэффициент выбросов CO₂ рассчитывался по формуле (2):

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

где EF_{CO_2} – коэффициент выбросов CO₂ от производства метанола, т CO₂/т метанола;

E_{CO_2} – выбросы CO₂ от производства метанола за год, тонны;

MT – годовое производство метанола, тонны.

Расчеты коэффициентов выбросов проводились для 1995, 2000, 2005, 2010 и 2015-2022 гг.

Необходимые для расчетов данные были получены благодаря сотрудничеству предприятий-производителей, которые передали авторам следующую информацию о работе предприятий за эти годы:

1. Технологический регламент производства метанола.
2. Принципиальная технологическая схема производства метанола.
3. Установленная мощность производства.
4. Полный расход природного газа на производство метанола за год.
5. Годовой выпуск метанола-ректификата.
6. Паспорта качества природного газа или другого углеводородного сырья.
7. Расходные коэффициенты по природному газу среднегодовые.

Данные от ПАО «Акрон» (доля в производстве метанола в стране 2.0%) не получены. Кроме того, не удалось использовать в расчетах данные, полученные от АО «Ангарская нефтехимическая компания», доля которой в производстве метанола в стране 1.25%. Отсутствие этих данных не окажет существенного влияния на качество расчета национального коэффициента выбросов, так как доля этих предприятий в производстве метанола в стране незначительная.

ООО «Газпром метанол» передал только технологический регламент производства с указанием максимального удельного расхода природного газа на производство метанола в 2017-2022 гг. Отсутствие данных по ежегодному производству метанола и расходу природного газа на его производство приводит к тому, что оценка выбросов CO₂ от производства метанола на этом предприятии является не точной.

Данные, полученные от остальных предприятий, были использованы в расчетах коэффициентов выбросов. Предприятия не всегда имели возможность передать данные за весь период исследования. Доля предприятий в производстве метанола в стране, данные которых были учтены при расчете национального коэффициента выбросов за 1995 г., составляла 51%. В последующие годы она постепенно повышалась и в 2017-2022 гг. составила 88-93%.

Все предприятия, за исключением АО «Невинномысский Азот» и АО «Ангарская нефтехимическая компания», в качестве сырья и топлива для производства метанола используют природный газ. АО «Невинномысский Азот» в качестве сырья использует синтез-газ, отходящий от производства ацетилена, а АО «Ангарская нефтехимическая компания» использует продувочные и танковые газы от других производств предприятия.

Данные, переданные предприятиями, не могут быть приведены в данной статье по причине их конфиденциальности. Рассчитанные с использованием этих данных значения среднего удельного расхода природного газа на производство тонны метанола для всей отрасли учитывают, в том числе, расход природного газа при технологических простоях (см. далее табл. 4).

Для всех предприятий содержание углерода в природном газе, использованном для производства метанола, рассчитывалось на основании данных о среднем за год компонентном (молярном) составе природного газа, представленном в паспортах качества природного газа или синтез-газа, переданных предприятиями. В обобщенном виде эти данные представлены в табл. 2

Таблица 2. Молярный состав природного газа, используемого в качестве сырья на предприятиях-производителях метанола, по данным паспортов качества природного газа

Table 2. Molar composition of natural gas used as a raw material at methanol producing enterprises, according to natural gas quality certificates

Год	Молярные доли компонентов природного газа, %				
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CO ₂
1995	97.5 – 98.7	0.4 – 1.1	0.15 – 0.33	0.05 – 0.12	0.078
2000	97.5 – 98.6	0.5 – 1.1	0.11 – 0.33	0.03 – 0.12	0.078
2005	97.5 – 98.5	0.5 – 1.1	0.15 – 0.33	0.09 – 0.12	0.078
2010	97.1 – 97.7	1.0 – 1.5	0.30 – 0.43	0.09 – 0.14	0.07 – 1.0
2015	95.5 – 96.8	1.7 – 2.5	0.53 – 0.88	0.18 – 0.25	0.16 – 0.17
2016	95.4 – 96.7	1.7 – 2.5	0.55 – 0.82	0.17 – 0.26	0.12 – 0.18
2017	95.8 – 96.6	1.6 – 2.3	0.51 – 0.79	0.16 – 0.19	0.12 – 0.16
2018	96.2 – 96.8	1.6 – 2.1	0.52 – 0.66	0.16 – 0.20	0.14 – 0.16
2019	96.3 – 96.8	1.6 – 2.0	0.51 – 0.62	0.15 – 0.20	0.13 – 0.16
2020	95.8 – 96.3	2.0 – 2.3	0.63 – 0.75	0.18 – 0.27	0.15 – 0.18
2021	95.7 – 96.3	2.0 – 2.4	0.57 – 0.76	0.17 – 0.22	0.16 – 0.20
2022	94.0 – 95.5	2.6 – 3.5	0.78 – 1.11	0.23 – 0.37	0.21 – 0.30

По данным, переданным предприятиями, по методике баланса углерода были рассчитаны коэффициенты выбросов для каждого предприятия и для каждого года, для которого данные были представлены предприятиями. В результате расчетов получены 68 значений коэффициентов выбросов CO₂ от предприятий. Полученные значения характеризуются широким диапазоном: от 0.36 до 1.24 т CO₂/т произведенного метанола. При этом значения коэффициентов выбросов для каждого предприятия при условии отсутствия модернизации или ввода новых мощностей производства остаются стабильными для всего периода времени. Таким образом, значения коэффициентов выбросов определяются технологиями производства метанола, применяемыми на предприятиях.

На рис. 2 представлена гистограмма распределения полученных расчетных значений коэффициентов выбросов CO₂ для всех входящих в исследование предприятий для всего периода времени (1995-2022 гг.).

Минимальные значения коэффициентов выбросов (0.36-0.39 т CO₂/т метанола) характерны для новых предприятий (год запуска производства 2011-2016 гг.), использующих технологии паровой, паровой и паровоздушной, паровой и парокислородной конверсии метана с установками адиабатического преформинга.

Несколько более высокими (0.45-0.61 т CO₂/т метанола) коэффициентами выбросов характеризуются производства, использующие следующие технологии:

- паровая конверсия метана и парциальное окисление метана кислородом;
- совместное производство аммиака и метана, паровая конверсия метана с установкой вторичного риформинга.

Предприятия, использующие технологии паровой и пароуглекислотной конверсии метана, характеризуются коэффициентами выбросов CO_2 от 0.64 до 0.86 т CO_2 /т метанола. Одно из предприятий имеет аномально высокие коэффициенты выбросов – от 1.03 до 1.24 т CO_2 /т метанола для разных лет своей работы.

Предприятие, использующее в качестве сырья синтез-газ от производства ацетилен, характеризуется такими же коэффициентами выбросов, как и предприятия, использующие технологию паровой конверсии метана.

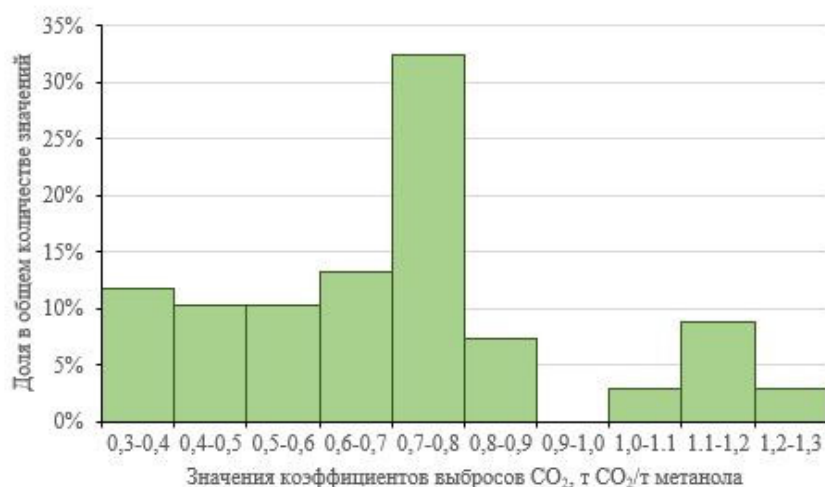


Рисунок 2. Гистограмма распределения расчетных значений коэффициентов выбросов CO_2 на российских предприятиях-производителях метанола в период 1995-2022 гг.

Figure 2. Bar chart distribution of calculated CO_2 emission factors for Russian methanol producing enterprises in 1995-2022

Для предприятий, использующих сходные технологии, полученные в ходе работы коэффициенты выбросов имеют близкие значения. Среднеквадратичное отклонение от средних значений коэффициентов выбросов для таких предприятий не превышает 10%.

Результаты оценки выбросов CO_2 от предприятий, использующих различные технологии производства метанола, представлены в табл. 3.

В руководстве МГЭИК (IPCC, 2006) представлены 2 коэффициента выбросов CO_2 от производства метанола, которые могут быть сопоставлены с полученными в результате настоящего исследования:

1. Коэффициент выбросов для технологии паровой конверсии природного газа без установки предварительного риформинга (0.67 т CO_2 /т метанола) на 10% ниже полученного нами коэффициента выбросов для этой технологии (0.746 т CO_2 /т метанола);

2. Коэффициент выбросов для технологии паровой конверсии природного газа с установкой предварительного риформинга (0.497 т CO₂/т метанола) на 31% выше полученного нами для той же технологии (0.378 т CO₂/т метанола).

Таблица 3. Расчетные коэффициенты выбросов CO₂ от предприятий-производителей метанола, использующих различные технологии производства

Table 3. Estimated CO₂ emission factors from methanol producing enterprises using various production technologies

Технология производства метанола	Среднее значение коэффициента выбросов, т CO ₂ /т метанола	Среднеквадратичное отклонение, т CO ₂ /т метанола
Паровая, паровая и паровоздушная, паровая и парокислородная конверсии метана с предварительным риформингом	0.378	± 0.013 (±3.4%)
Паровая конверсия метана и парциальное окисление метана кислородом; Совместное производство аммиака и метанола, паровая конверсия метана с установкой вторичного риформинга	0.515	± 0.045 (±8.7%)
Паровая и пароуглекислотная конверсия метана	0.746	± 0.069 (±9.2%)
Паровая конверсия метана	1.160*)	± 0.060 (±5.2%)

*) Единственное предприятие с аномально высоким средним значением коэффициента выбросов

Такая относительно большая разница может быть связана с тем, что коэффициенты выбросов МГЭИК получены по результатам исследования, опубликованного в 1996 г., в то время как полученные нами коэффициенты выбросов рассчитаны для предприятий, запущенных после 2010 г.

В доступной авторам научно-технической литературе данные по коэффициентам выбросов CO₂ от производства метанола отсутствуют.

В специализированной базе данных коэффициентов выбросов МГЭИК (доступна в интернете по адресу: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB>) представлены только коэффициенты выбросов из руководства МГЭИК (IPCC, 2006). В других авторитетных базах данных (CORINAIR, EPA) коэффициенты выбросов при производстве метанола не представлены.

Разработка национальных коэффициентов выбросов CO₂ от производства метанола в Российской Федерации

Полученные расчетные коэффициенты выбросов предприятий были использованы для разработки национальных коэффициентов выбросов CO₂ от производства метанола в Российской Федерации. Национальные коэффициенты выбросов рассчитывались для 1995, 2000, 2005, 2010, 2015-2022 гг. как средневзвешенное по производству метанола значение коэффициентов

выбросов отдельных предприятий. Доля предприятий, коэффициенты выбросов которых были использованы для расчета национальных коэффициентов выбросов CO₂ от производства метанола, в производстве метанола в стране изменяется от 51% в 1995 г. до 93% в 2022 г. Результаты расчетов национальных коэффициентов выбросов CO₂ от производства метанола представлены в табл. 4.

Таблица 4. Производство метанола в Российской Федерации, средний удельный расход природного газа на его производство и значение национального коэффициента выбросов

Table 4. Methanol production in the Russian Federation, the average specific consumption of natural gas for its production and the national emission factor

Год	Производство метанола в стране по данным Росстата, тыс. тонн	Производство метанола на предприятиях, передавших данные для расчета национальных коэффициентов, тыс. тонн (доля от производства в стране, %)	Средний удельный расход природного газа на производство метанола в стране по данным предприятий*), ст. м ³ /т метанола	Значение национального коэффициента выбросов CO ₂ от производства метанола, т CO ₂ /т метанола
1995	1522.9	782.8 (51)	1183.8	0.801
2000	1914.1	1122.2 (59)	1143.6	0.731
2005	2943.1	1987.0 (68)	1150.4	0.745
2010	2941.9	2163.5 (74)	1132.3	0.722
2015	3598.3	2535.9 (70)	1071.0	0.656
2016	3658.8	2769.6 (76)	1082.1	0.675
2017	4081.2	3582.5 (88)	1067.8	0.641
2018	4387.9	3878.3 (88)	1065.7	0.637
2019	4529.3	4019.8 (89)	1054.4	0.615
2020	4421.0	3920.9 (89)	1034.1	0.585
2021	4507.1	4065.1 (90)	1034.4	0.586
2022	4509.2	4186.8 (93)	1026.9	0.598

*) Средний удельный расход природного газа рассчитывался только для предприятий, использующих природный газ в качестве сырья. Измеряется в м³ при стандартных условиях.

Неопределенность оценки национальных коэффициентов выбросов при использовании балансового метода по данным отдельных предприятий, согласно (IPCC, 2006), составляет ±5%.

Полученные результаты показывают, что в 1995 г. коэффициент выбросов CO₂ в целом по отрасли существенно (на 20%) превосходил коэффициент выбросов МГЭИК по умолчанию (0.67 т CO₂/т метанола) (IPCC, 2006). За период с 1995 г. по 2020 г. коэффициент выбросов диоксида углерода от производства метанола в стране значительно (на 25-27%) снизился и в 2020-2022 гг. достиг уровня в 0.585-0.598 т CO₂/т метанола. В 2020-2022 гг. значения полученного национального коэффициента выбросов являются стабильными и на 11-13% ниже коэффициента выбросов МГЭИК по умолчанию. Такое существенное снижение выбросов CO₂ от производства метанола (на 25-27%)

за период времени с 1995 г. по 2022 г. связано с модернизацией существующих предприятий и строительством новых производств, использующих современные технологии.

При отсутствии существенных изменений в отрасли, связанных с вводом новых мощностей по производству метанола, модернизацией и закрытием старых, средний коэффициент выбросов CO_2 за 2020-2022 гг., равный $0.59 \text{ т CO}_2/\text{т метанола}$ может быть использован для оценки выбросов от производства метанола в стране в ближайшие годы.

Полученные национальные коэффициенты выбросов были использованы для оценки выбросов CO_2 от производства метанола в 1990-2022 гг. На рис. 3 представлено сравнение результатов оценки выбросов CO_2 от производства метанола по методике 1 уровня МГЭИК (Национальный доклад, 2023) с использованием коэффициента выбросов по умолчанию и оценки выбросов с использованием полученных национальных коэффициентов.

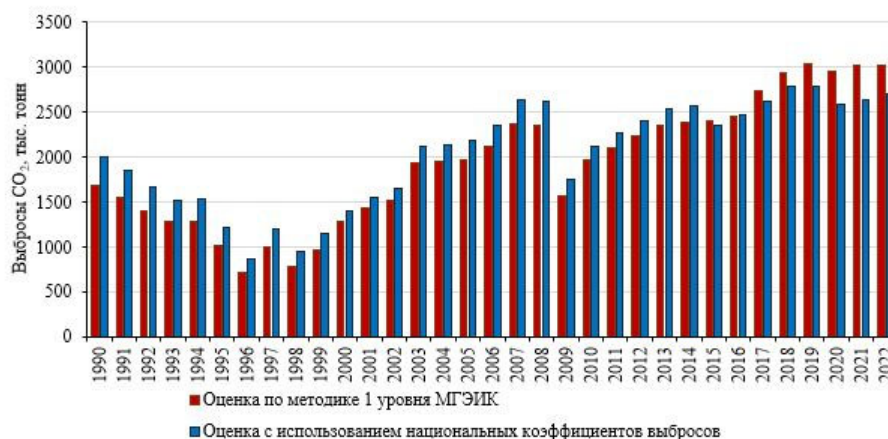


Рисунок 3. Сравнение результатов оценки выбросов CO_2 от производства метанола по методике 1 уровня МГЭИК и с использованием разработанных национальных коэффициентов выбросов, Гг

Figure 3. Comparison of CO_2 emission estimations from methanol production using the IPCC Tier 1 methodology and using developed national emission factors, Gg

Выводы

Коэффициенты выбросов диоксида углерода оценивались по методике МГЭИК, основанной на балансе углерода, введенного в производственный процесс с сырьевыми материалами и выходящего из процесса в составе нефтехимических продуктов. В расчетах использовались данные предприятий за 1995, 2000, 2005, 2010, 2015-2022 гг. Доля предприятий, данные которых использованы для оценки национальных коэффициентов выбросов, в производстве метанола в стране составляет от 51% в 1995 г. до 93% в 2022 г.

Полученные в результате расчетов коэффициенты выбросов для отдельных предприятий характеризуются широким диапазоном значений: от 0.36 до 1.24 т CO₂/т произведенного метанола. При этом значения коэффициентов выбросов для одного предприятия при условии отсутствия модернизации или ввода новых мощностей производства остаются стабильными для всего периода времени.

Современные предприятия, использующие технологии паровой, паровой и паровоздушной, паровой и парокислородной конверсии метана с установками адиабатического предриформинга характеризуются минимальными значениями коэффициента выбросов (0.36-0.39 т CO₂/т метанола); более высокие значения (0.45-0.61 т CO₂/т метанола) характерны для предприятий, использующих технологии паровой конверсии метана и парциального окисление метана кислородом и паровой конверсии метана с установкой вторичного риформинга; максимальные значения коэффициентов выбросов (0.64-0.86 т CO₂/т метанола) характерны для предприятий, использующих технологии паровой и пароуглекислотной конверсии метана.

Для предприятий, использующих сходные технологии, полученные в ходе работы коэффициенты выбросов имеют близкие значения. Среднеквадратичное отклонение от средних значений коэффициентов выбросов для таких предприятий не превышают 10%.

Национальные коэффициенты выбросов рассчитывались для 1995, 2000, 2005, 2010, 2015-2022 гг. как средневзвешенное по производству метанола значение коэффициентов выбросов отдельных предприятий. За период с 1995 г. по 2020 г. национальный коэффициент выбросов CO₂ от производства метанола существенно (на 25-27%) снизился с 0.801 т CO₂/т метанола в 1995 г. до 0.585-0.598 т CO₂/т метанола в 2020-2022 гг.

Полученные национальные коэффициенты выбросов CO₂ от производства метанола отражают технологические особенности российских предприятий и существенно снижают неопределенность оценки выбросов от производства метанола в национальном кадастре с 30% (методика 1 уровня МГЭИК) до 10%.

При отсутствии существенных изменений в отрасли, связанных с вводом новых мощностей по производству метанола, модернизацией и закрытием старых, средний коэффициент выбросов CO₂ за 2020-2022 гг., равный 0.59 т CO₂/т метанола, может быть использован для оценки выбросов от производства метанола в стране в ближайшие годы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность к.ф.-м. н. А.И. Нахутину за помощь, оказанную при проведении исследований и подготовке статьи.

Работа выполнена в рамках проекта "Российская система климатического мониторинга" (ВИП-ГЗ) и темы 3.3 плана НИТР Росгидромета на 2023 год.

Список литературы

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

Сосна, М.Х., Заволокин, К.Х., Хаманова, А.А. (2018) Повышение эффективности производства метанола путем утилизации продувочного газа, *НефтеГазоХимия*, № 3, с. 35-38.

VYGON consulting (2019) *Газохимия России. Часть 1. Метанол, пока только планы*. М., ООО «Выгон колсантинг», 52 с.

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

References

NDK (2023) *Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov, ne reguliruemyyh Monreal'skim protokolom za 1990-2021 gg. v 2 tomah* [National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol for 1990-2021 in 2 volumes], Moscow, Russia.

Sosna, M.H., Zavolokin, K.H., Hamanova, A.A. (2018) *Povyshenie effektivnosti proizvodstva metanola putem utilizacii produvochnogo gaza*. [Improving the efficiency of methanol production by recycling purge gas] *NefteGazoHimiya – Petrochemistry*, no. 3, pp. 35-38.

VYGON consulting (2019) *Gazohimiya Rossii, Chast' 1. Metanol, пока tol'ko plany* [Gas chemistry of Russia. Part 1. Methanol, only plans so far.], ООО VYGON consulting, Moscow, Russia. 52 p.

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

Статья поступила в редакцию (Received): 25.12.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 27.05.2024).

Для цитирования / For citation

Аникушин, Б.М., Бакурова, Э.Ю., Валов, С.В., Давлетшина, А.Р., Заволокин, К.А., Имшенник, Е.В., Сосна, М.Х. (2024) Разработка национальных

коэффициентов выбросов CO₂ от производства на предприятиях Российской Федерации, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 1-2, с. 73-88, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-73-88.

Anikushin, B.M., Bakurova, E.Yu., Valov, S.V., Davletshina, A.R., Zavolokin, K.A., Imshennik, E.V., Sosna, M.H. (2024) Developing of national CO₂ emission factors from methanol production at the enterprises of the Russian Federation, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXV, no. 1-2, с. 73-88, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-73-88.

Динамика коэффициента выбросов диоксида углерода от производств этилена в России в 1990-2022 годы

М.В. Михайлов, А.В. Ковешников, Н.И. Зеленцова, Е.В. Илларионова,
С.Ю. Васьков*

ООО «ВНИИОС-наука»,
Россия, 109240, Москва, ул. Никольямская, 13 с. 2

*Адрес для переписки: mtmv@vniios-n.ru

Реферат. С начала XX века наблюдается чрезмерное усиление парникового эффекта, вызванное постоянно растущими объемами сжигаемого ископаемого топлива. Изменения в климатической системе Земли обусловлены ростом атмосферной концентрации основных парниковых газов (углекислого газа, метана, озона, оксида азота и др.) антропогенного происхождения. В 2015 году на конференции ООН по климату в рамках Рамочной конвенции ООН по изменению климата страны-участники подписали Парижское соглашение, целью которого является удержание ежегодного прироста глобальной средней температуры планеты в пределах 2.0°C. Чтобы достигнуть данной цели, участники Парижского соглашения предпринимают максимум усилий для снижения выбросов парниковых газов, включая создание систем учета выбросов парниковых газов на национальном, региональном и отраслевом уровнях.

В процессе научного исследования при анализе технологических схем получения этилена выявлены основные источники выбросов диоксида углерода от нефтехимических предприятий России, владеющих установками пиролиза с различными типами промышленных печей пиролиза и перерабатываемого сырья.

В работе представлены результаты расчетов ежегодных выбросов CO₂ и коэффициентов выбросов CO₂ от производств этилена в России за период с 1990 по 2022 года на основании фактических материальных балансов и теоретических расчетов количества выработанных предприятием продуктов в зависимости от вида перерабатываемого сырья с применением специализированного программного обеспечения для расчета процесса пиролиза. Показана стабильная динамика сокращения суммарного годового коэффициента выбросов диоксида углерода за рассмотренный период.

Рассчитанные коэффициенты выбросов CO₂ по статистическим производственным количественным показателям оказались ниже значения коэффициента Межправительственной группы экспертов по изменению климата.

Ключевые слова. Пиролиз углеводородов, этилен, диоксид углерода, парниковые газы, антропогенные выбросы.

Dynamics of the carbon dioxide emission factor from ethylene production in Russia in 1990-2022

M.V. Mikhailov, A.V. Koveshnikov, N.I. Zelentsova, E.V. Illarionova,
S.Yu. Vaskov*

LLC «VNIOS-science»,
Bld. 13, p. 2, Nikoloyamskaya str., 109240, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: mmv@vniios-n.ru

Abstract. Since the beginning of the 20th century, there has been an excessive increase in the greenhouse effect, caused by increasing volumes of fossil fuels burned. Changes in the Earth's climate system are due to an increase in the atmospheric concentration of the main greenhouse gases (water vapor, carbon dioxide, methane, ozone, nitrogen oxide, etc.) of anthropogenic origin. In 2015, the UN signed the Paris Agreement, the purpose of which was to keep the annual increase in the global average temperature of the planet within 2 degrees. In order to achieve this goal, the participating States are making every effort to reduce greenhouse gas emissions, including the creation of greenhouse gas emission accounting systems at the national, regional and sectoral levels.

In the process of scientific research during the analysis of technological schemes for the production of ethylene there were revealed the main sources of carbon dioxide emissions from petrochemical enterprises in Russia that own pyrolysis units with various types of industrial pyrolysis furnaces and processed raw materials.

The research presents the results of calculations of annual CO₂ emissions and emission factors by ethylene plants in Russia for the period from 1990 to 2022 based on actual material balances and theoretical calculations of the quantity of products produced by the enterprise, depending on the type of processed raw materials using specialized software for calculating the pyrolysis process. The stable dynamics of the reduction of the total annual carbon dioxide emission factor for the considered period is presented.

The calculated CO₂ emission factors by statistical production quantitative indicators turned out to be lower than the factor of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Keywords. Hydrocarbon pyrolysis, ethylene, carbon dioxide, greenhouse gases, anthropogenic emissions.

Введение

Основной причиной антропогенного накопления углекислого газа в атмосфере является сжигание ископаемых видов топлива (уголь, нефть, природный газ и т.д.) для производства энергии промышленными предприятиями для обеспечения технологических процессов и в двигателях внутреннего сгорания наземных, воздушных и водных транспортных средств (Фёдоров и др.,

2022). Кроме того, выбросами CO₂ сопровождаются некоторые промышленные процессы, связанные с использованием углеродосодержащего сырья. Накопление CO₂ в атмосфере приводит к парниковому эффекту, способствуя глобальному изменению климата (Щербань, 2021).

Согласно Федеральному закону от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов», распоряжению Правительства РФ от 1 марта 2006 г. № 278-р, а также Приказу Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 25.04.2022 № 298 «Об утверждении порядка подготовки кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов» специалистами Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (ФГБУ «ИГКЭ») разрабатываются общие и детализированные оценки выбросов и абсорбции парниковых газов (ПГ) на территории Российской Федерации. В настоящее время для оценки выбросов диоксида углерода от производств этилена используется коэффициент выбросов по умолчанию, предоставленный Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Производство этилена является одной из ведущих частей нефтехимической отрасли в России. На 2024 год на территории Российской Федерации эксплуатируется 11 нефтехимических предприятий (общей мощностью более 4 млн тонн этилена в год) с установками пиролиза:

- 7 предприятий в Приволжском федеральном округе;
- 1 предприятие в Северо-Кавказском федеральном округе;
- 1 предприятие в Уральском федеральном округе;
- 2 предприятия в Сибирском федеральном округе.

В активной фазе строительства находятся 3 нефтехимических предприятия с установками пиролиза (в Приволжском, Сибирском, Дальневосточном федеральных округах), на стадии проектирования – 2 предприятия (в Северо-Западном и Сибирском федеральных округах).

Сырьем для получения этилена методом пиролиза являются различные углеводороды и их смеси от этана до гидроподготовленных атмосферных газойлей.

На 2022 год по данным ООО «ВНИИОС-наука» за последние 20 лет структура сырья пиролиза в РФ практически неизменна: 46-54 % бензинового сырья, 39-49 % газового сырья, 5-9 % этана. На большинстве этиленовых производств на печах пиролиза перерабатывается нескольких типов сырья.

Для уточнения в национальном кадастре оценок выбросов диоксида углерода от объектов нефтехимии в Российской Федерации, компанией ООО «ВНИИОС-наука» было произведено исследование и расчет выбросов CO₂ за период с 1990 по 2022 годы от предприятий России, эксплуатирующих промышленные установки производства мономеров с различными типами крупнотоннажных печей пиролиза.

Полученные в рамках работы результаты позволят оценить целесообразность использования коэффициента выбросов, установленного МГЭИК, для оценки выбросов диоксида углерода от производств этилена на территории

Российской Федерации и исключить систематические погрешности, связанные с принятыми для России географическим поправочным коэффициентом и видом сырья.

Основы процесса пиролиза и получения этилена

Распространенный и единственный используемый в промышленности РФ способ получения этилена – пиролиз углеводородного сырья. Пиролиз – термический паровой крекинг углеводородного сырья (этана, широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ), бензиновых фракций) – эндотермический процесс, который осуществляется в змеевиках трубчатых печей при температурах 750-880°C в присутствии водяного пара. В результате протекания реакций образуется смесь углеводородов различного строения (пирогаз), из которого выделяют этилен и другие побочные продукты (пропилен, пиро-конденсат, смолу пиролизную тяжелую, бутилен-бутадиеновую (ББФ) и метано-водородную фракции (МВФ)). На состав пирогаза (в том числе количество получаемых этилена и метана) влияет ряд факторов – состав сырья, тип печи пиролиза (конфигурация радиантного змеевика и время пребывания в реакционной зоне), температура пиролиза, давление в радиантном змеевике, количество пара разбавления, расход сырья. Дополнительно на количество выбросов CO₂ влияет термический коэффициент полезного действия (КПД) печи пиролиза.

Основное влияние на количество продуктов пиролиза оказывает состав сырья (табл. 1). Сырьевая база этиленовых производств определяется первоначальным проектом или может быть изменена при реконструкции предприятия. Трубчатые печи могут перерабатывать как жидкое, так и газообразное сырье, при этом переход от одного типа сырья к другому не требует каких-либо кардинальных изменений в конструкции печного блока. В случае переработки на одном производстве нескольких типов сырья (например, ШФЛУ и бензина) их соотношение редко существенно меняется в течение года и зависит от текущих рыночных или экономических показателей. Продукты пиролиза с печного блока, состоящего из нескольких печей пиролиза, осуществляющих процесс на разном сырье, поступают в коллектор пирогаза, откуда одним потоком направляются в цех газоразделения.

Выход метана (за проход) варьируется от 9.66% масс. для чистого этана до 23.9% масс. для пропана. Для более тяжелых сырьевых углеводородов выход метана лежит в пределах указанного выше диапазона.

Большая часть российских пиролизных производств ориентирована на получение этилена и пропилена, что предполагает ведение процесса пиролиза при высоких температурах порядка 830-860°C. При пиролизе этана выход этилена на ~28% абс. выше, чем при пиролизе бензина, и на ~22% абс. выше, чем при пиролизе пропана или бутана.

Таблица 1. Содержание этилена и МВФ в пирогазе, полученного пиролизом различного сырья

Table 1. Ethylene and IMF content in pyrolysis gas obtained by pyrolysis of various raw materials

Продукты, % масс.	Этан	Пропан	н-Бутан	Изобутан	ШФЛУ	Бензин
Температура пиролиза, °C	845	850	850	760	850	840
C ₂ H ₄	54.80	33.50	31.00	2.70	32.25	26.40
H ₂	5.72	1.40	0.80	0.70	1.10	1.10
CH ₄	9.66	23.90	20.40	12.80	22.15	15.30
ΣH ₂ +CH ₄ (МВФ)	15.38	25.30	21.40	13.50	23.25	16.40

Основные источники выбросов CO₂ на этиленовых производствах

Основными источниками углекислого газа на производствах пиролиза являются дымовые газы печей пиролиза, нагревательных печей газа регенерации и выбросы от сжигания углеводородов на факеле.

Полученная при разделении пирогаза метано-водородная фракция используется как топливный газ в печах пиролиза и нагревательных печах. Избыток МВФ сжигается на факеле или используется в качестве топлива на смежных производствах. В случае нехватки топливного газа на производство этилена подается природный газ или другой газ из топливной сети предприятия. Печи пиролиза являются главным источником выбросов CO₂, а получаемый в процессе производства мономеров метан (в составе МВФ) – основным ресурсом синтеза диоксида углерода.

Расход стороннего топливного газа (поступающего на производство, а не вырабатываемого в процессе производства) крайне мал и практически не оказывает влияния на суммарный выброс CO₂ от предприятия при нормальном режиме работы ввиду того, что выработка метано-водородной фракции больше необходимой потребности в топливе. В качестве стороннего топливного газа этиленовые производства используют природный газ.

Потребность в дополнительном, стороннем топливе для печей пиролиза может возникнуть лишь во время пуска производственной линии (продолжительность 4-7 суток 1 раз в год), при значительном дефиците сырья пиролиза или при пиролизе этана, при котором создаётся дефицит топливного газа ввиду низкого выхода метано-водородной фракции (Салохиддинов, 2023). На предприятиях, имеющих в своей сырьевой корзине большую долю этановой фракции 45-70%, выход этилена выше на 20-30%, а выход метана ниже, чем при переработке ШФЛУ (сжиженных углеводородных газов (СУГ)) или бензина. В случае переработки на предприятиях исключительно этановой фракции создается дефицит топливного газа, который компенсируется вовлечением стороннего природного газа. В России переработка этана осу-

ществляется только в составе смешанного сырья (этан и СУГ). Количество вырабатываемого МВФ в процессе переработки СУГ исключает возникающий дефицит топливного газа при пиролизе этана, поэтому потребление дополнительного природного газа в течение годового цикла производства незначительно. На основании низких расходных норм импортируемого газа в сравнении с МВФ, поступающей в топливную систему с блока газоразделения, природный газ не учитывается в расчете суммарных выбросов CO_2 от производств этилена при нормальном режиме работы.

На факельные системы предусмотрены сбросы топливного газа при образовании его избытка или при проведении регламентных операций технологического процесса и из технологических установок от предохранительных клапанов в аварийных ситуациях.

Расчет коэффициентов выбросов CO_2 на установках пиролиза

При сжигании метано-водородной фракции образование диоксида углерода возможно лишь из метана.

Содержание метана в МВФ на всех этиленовых производствах различается и в среднем варьируется в пределах 90-97% масс. Для определения количества метана, ежегодно сжигаемого на предприятии с установкой пиролиза, учитывался расход МВФ, вырабатываемой конкретным предприятием, и коэффициент содержания метана для каждого предприятия:

$$F_{\text{CH}_4} = F_{\text{МВФ}} \cdot k_{\text{CH}_4}, \quad (1)$$

где F_{CH_4} – расход метана, сжигаемого на этиленовом производстве, т г^{-1} ; $F_{\text{МВФ}}$ – расход метано-водородной фракции, вырабатываемой этиленовым производством, т г^{-1} ; k – коэффициент содержания метана в метано-водородной фракции, массовая доля.

Количество углекислого газа, полученного в процессе сжигания метана за год рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{CO}_2} = \frac{F_{\text{CH}_4} \cdot M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CH}_4}}, \quad (2)$$

где F_{CO_2} – количество углекислого газа, полученного при сжигании метана на этиленовом производстве, т г^{-1} ; M_{CO_2} – молярная масса углекислого газа, г моль^{-1} ; M_{CH_4} – молярная масса метана, г моль^{-1} .

Коэффициент выбросов CO_2 согласно руководящим принципам национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК рассчитывается как отношение количества диоксида углерода к количеству полученного этилена:

$$K = \frac{F_{CO_2}}{F_{C_2H_4}}, \quad (3)$$

где K – коэффициент выбросов CO_2 от годового производства этилена, тонна диоксида углерода на тонну этилена ($t\ CO_2/t\ C_2H_4$); $F_{C_2H_4}$ – количество этилена, полученного на нефтехимическом предприятии с установкой пиролиза, $t\ год^{-1}$.

Коэффициент выбросов CO_2 от производств этилена Российской Федерации за период 1990-2022 гг.

В процессе исследовательской работы обработан массив статистических данных по работе тринадцати этиленовых производств России за 32 года (2 нефтехимических предприятия прекратили производство этилена после 1994 г.), включающий количество и тип перерабатываемого сырья, выработку этилена и метано-водородной фракции, состав МВФ. Расчет коэффициентов выбросов CO_2 проведен по статистическим данным для каждого этиленового производства и для всей отрасли производства этилена в России (национальный коэффициент выбросов). При отсутствии данных по выработке МВФ на отдельных производствах были произведены теоретические расчеты количества выработанной производством метано-водородной фракции в зависимости от вида перерабатываемого сырья с применением программы ТЕРРА-СУГ МБ (специализированное программное обеспечение собственной разработки ООО «ВНИИОС-наука» для расчета процесса пиролиза).

Национальные коэффициенты выбросов CO_2 для всех этиленовых производств РФ за период 1990-2022 гг. варьируются от 1.23 до 1.69 $t\ CO_2/t\ C_2H_4$ (рис. 1). В рассматриваемый период наблюдается тренд на снижение коэффициента за счет постепенного повышения эффективности этиленовых производств.

Причиной значительного роста значения коэффициента в период с 1991 по 1993 годы являются общее снижение мощности производства на фоне происходивших экономических событий и переход большинства этиленовых производств на газовое сырье (ШФЛУ или СУГ). Снижение и стабилизация значения коэффициента в период 1993-1998 гг. обусловлены нормализацией режима работы производства этилена в условиях сниженной нагрузки по сырью. Рост значения коэффициента в 1999 г. связан с изменением нагрузки производств этилена по сырью: в период с 1999 по 2006 год экономическая обстановка в стране стабилизировалась и этиленовые производства постепенно вернулись к объемам переработки сырья, сопоставимым с 1990 годом. В период с 2006 по 2014 гг. произошло четыре аварии на трёх крупнотоннажных этиленовых производствах, во время которых значительно сокращалась выработка этилена, влияющая на годовой коэффициент выбросов от этиленовых производств. Причиной минимума в 2010 г. является появление данных от крупнотоннажного этиленового производства, чья сырьевая корзина на тот

год почти на 70 % состояла из этана, переработка которого обеспечивает высокую выработку этилена и низкий выход МВФ.

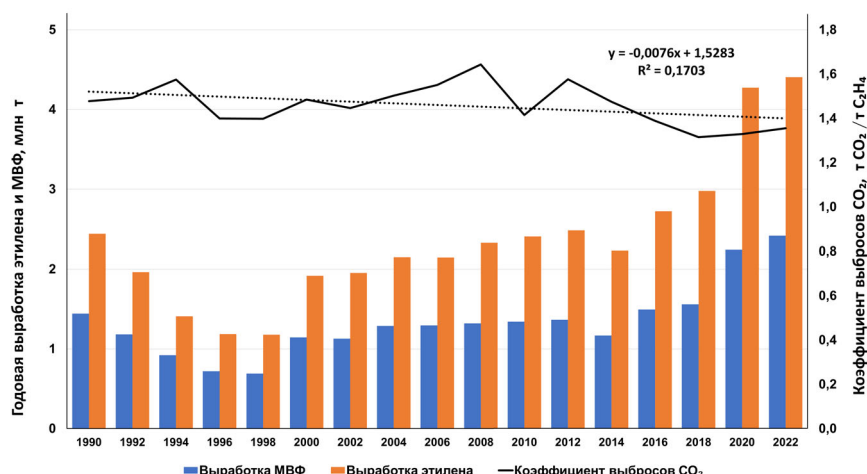


Рисунок 1. Динамика изменения годового коэффициента выбросов от этиленовых производств в 1990-2022 гг. и количество выработанного этилена и МВФ

Figure 1. Dynamics of changes in the annual emission factor from ethylene production in 1990 to 2022 and the quantity of produced ethylene and methane-hydrogen fraction (HMF)

Снижение значения годового коэффициента после 2012 года обусловлено незначительными изменениями в сырьевых корзинах производств этилена за указанный период – доля переработки этана увеличилась с 7% до 9%, ШФЛУ (СУГ) – с 39% до 40%, жидких бензиновых фракций уменьшилась с 54% до 51%. Рост значения коэффициента после 2019 г. является следствием введения в эксплуатацию новой установки в Уральском Федеральном округе и проведением реконструкций по наращиванию мощностей уже работающих производств.

Основываясь на полученной выборке коэффициентов выбросов CO₂ в период 1990-2022 гг., среднегодовой коэффициент выбросов диоксида углерода от производств этилена в России составил 1.49 т CO₂/т C₂H₄.

При отсутствии существенных изменений в отрасли (ввод в эксплуатацию новых крупнотоннажных этиленовых производств, аварийных ситуаций) и сохранении структуры текущей сырьевой корзины при дальнейшей оценке выбросов и абсорбции парниковых газов на территории Российской Федерации от этиленовых производств следует использовать коэффициент выбросов CO₂ для 2022 года – 1.36 т CO₂/т C₂H₄.

В случае увеличения доли этана в сырьевой корзине этиленовых производств необходимо провести корректировку среднегодового коэффициента выбросов диоксида углерода, основываясь на статистических данных производств со схожей структурой сырья.

Для эффективности решений в области климатической политики РФ необходимо осуществлять регулярные мониторинги и расчет выбросов парниковых газов от этиленовых производств, основываясь на фактических данных производств.

Обсуждение полученных результатов

Межправительственной группой экспертов по изменению климата согласно Руководящим принципам национальных инвентаризаций парниковых газов (МГЭИК, 2006) для Российской Федерации коэффициент выбросов CO_2 от производства этилена паровым крекингом (пиролизом) установлен $2.25 \text{ т CO}_2/\text{т C}_2\text{H}_4$ ($1.74 \text{ т CO}_2/\text{т C}_2\text{H}_4 + 30\%$). Для оценки выбросов CO_2 от нефтехимического производства представители МГЭИК из-за отсутствия статистических данных по видам перерабатываемого сырья на всех этиленовых производствах по умолчанию используют коэффициенты выбросов, установленные для каждого континента с конкретным видом перерабатываемого сырья. Согласно МГЭИК сырьём для установок парового крекинга в России служит нефтя, а соответствующий ей коэффициент выбросов диоксида углерода равен $1.74 \text{ т CO}_2/\text{т C}_2\text{H}_4$. Чтобы учесть разницу в энергетической эффективности установок парового крекинга для различных стран и регионов дополнительно вводится географический поправочный коэффициент. Для России он составляет 130%, что сопоставимо со странами Африки и Азии.

Проведенные исследования показывают, что среднегодовой коэффициент выбросов диоксида углерода от производств этилена составил $1.49 \text{ т CO}_2/\text{т C}_2\text{H}_4$ в период 1990-2022 гг., что на 33.8% ниже установленного МГЭИК коэффициента выброса CO_2 для Российской Федерации. Учитывая диапазон неопределенности для коэффициентов выбросов и данных о деятельности, который составляет $\pm 30\%$ для производств этилена, рассчитанные коэффициенты выбросов в 72% случаях не вписываются в рамки установленной неопределенности МГЭИК (рис. 2).

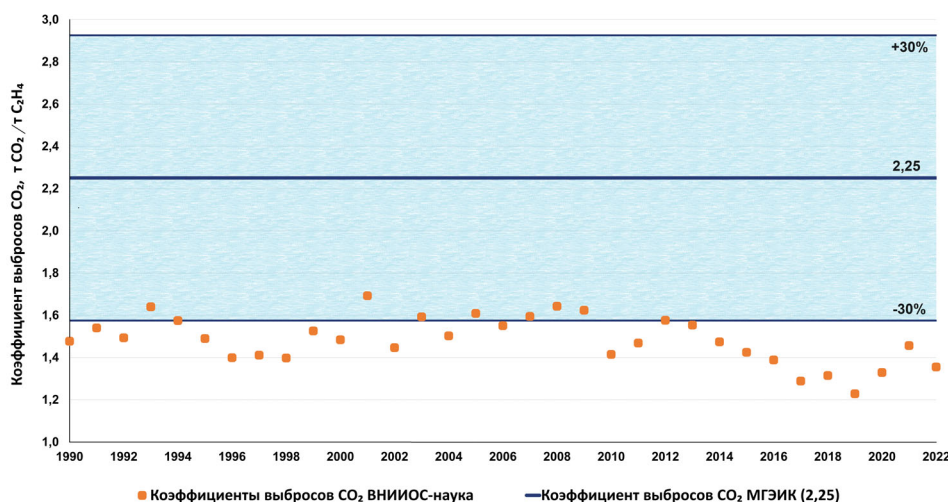


Рисунок 2. Сопоставление расчетных коэффициентов выбросов диоксида углерода от этиленовых производств в 1990-2022 гг. с коэффициентом выбросов CO_2 МГЭИК

Figure 2. Comparison of calculated carbon dioxide emission factors from ethylene plants in 1990 to 2022 with the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) CO_2 emission factor

Расхождения коэффициента выбросов МГЭИК с коэффициентами, полученными в рамках работы на основании фактических данных, указывают на неадекватность коэффициента МГЭИК условиям РФ и на отсутствие необходимости использования предлагаемого МГЭИК коэффициента выбросов CO₂, ввиду его завышенного значения.

Заключение

В ходе исследования были произведены расчеты и анализ динамики изменений коэффициентов выбросов CO₂ для отдельных производств этилена в 1990-2022 гг., а также расчет ежегодных коэффициентов выбросов для всех этиленовых производств с учётом их фактических данных в рассматриваемый период. Показана отрицательная динамика национального коэффициента выброса CO₂ в России за рассматриваемый период.

Среднегодовой коэффициент выбросов диоксида углерода от производств этилена в период 1990-2022 гг. составил 1.49 т CO₂/т C₂H₄, что на 33.8 % ниже коэффициента, рекомендованного МГЭИК.

Полученные результаты исключают систематическую погрешность, связанную с поправочным географическим коэффициентом, и представляются более объективными для проведения расчетных оценок выбросов CO₂ от производства этилена, чем установленные для Российской Федерации коэффициенты выбросов, предлагаемые МГЭИК.

При дальнейшем использовании представленных в работе коэффициентов выбросов CO₂ от этиленовых производств необходимо указывать наименование сектора «Промышленные процессы использования продукции» (ППИП), к которому относятся выбросы от сжигания МВФ, вырабатываемого в процессе производства этилена. В случае потребности производства в дополнительном (стороннем) топливе, образующиеся выбросы CO₂ будут относиться к сектору «Энергетика».

Работа выполнена в рамках проекта "Российская система климатического мониторинга" (ВИП-ГЗ).

Список литературы

Ковешников, А.В., Корнеев, М.А., Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ВНИИОС-наука» (2023) *Программа для ЭВМ «ТЕРРАСУГ МБ»*. № 2023610621. заявл. 17.01.2023. опубл. 06.02.2023, заявитель, электронная копия доступна на сайте Федерального института промышленной собственности ФИПС, электронный ресурс, URL: <https://www.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=PrEVM&id=3A327FE5-675A-49A8-B06C-32AB482F356C> (дата обращения 26.03.2024).

МГЭИК (2006) *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов Межправительственной группы экспертов по изменению климата*. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов, т. 1-5.

Салохиддинов, Ф.А. (2023) Анализ основных показателей печей пиролиза, *Аллея науки, электрон. науч. журн.* т. 1, № 6 (81), с. 40-43.

Щербань, А.В. (2021) Парниковый эффект и его воздействие на окружающую среду, *Экономика и экология территориальных образований*, т. 5, № 2, с. 59-65.

Фёдоров, В.М., Алтунин, И.В., Фролов, Д.М. (2022) Влияние диоксида углерода антропогенного генезиса на термический режим атмосферы и его изменения, *Жизнь Земли*, т. 44, № 4, с. 402-414, Doi: 10.29003/m3115.0514-7468.2022_44_4/402-414.

References

Koveshnikov, A.V., Korneev, M.F. (2023) Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «VNIOS-nauka» [LLC «VNIOS-science»] Patent № 2023612578 Russian Federation. *Programma dlya EVM «TERRASUG MB»* [Computer program «ТЕРРАСУГМБ»]: № 2023610621, filed 17.01.2023, application. 06.02.2023 / «VNIOS-science» – FIPS: [website], URL: <https://www.fips.ru/publication-web/publications/documenttype=doc&tab=PrEVM&id=3A327FE5-675A-49A8-B06C-32AB482F356C> (date of the application 26.03.2024).

IPCC (2006) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme*, vol. 1-5.

Salohiddinov, F.A. (2023) Analiz osnovnyh pokazatelej pechej piroliza [Analysis of the main indicators of pyrolysis furnaces], *Alleya nauki* [Alley of Science], electron. scien. journal, vol. 1, no. 6 (81), pp. 40-43.

Fedorov, V.M., Altunin, I.V., Frolov, D.M. (2022) Vliyanie dioksida ugleroda antropogennogo genezisa na termicheskij rezhim atmosfery i ego izmeneniya [Influence of anthropogenic carbon dioxide on the thermal regime of the atmosphere and its changes], *Zhizn Zemli* [Life of the Earth], vol. 44, no. 4, pp. 402-414 (in Russ., abstract in Engl.). doi: 10.29003/m3115.0514-7468.2022_44_4/402-414.

Scherban', A.V. (2021). Parnikovyj effekt i ego vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredu [The greenhouse effect and its impacts on environment]. *Ekonomika I ekologiya territorial'nyh obrazovanij* [Economy and ecology of territorial formations], vol. 5, no. 2, pp. 59-65.

Статья поступила в редакцию (Received): 05.04.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 22.05.2024.

Для цитирования / Forcitation

Михайлов, М.В., Ковешников, А.В., Зеленцова, Н.И., Илларионова, А.В., Васьков С.Ю. (2024) Динамика коэффициента выбросов диоксида угле-

рода от производств, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 1-2, с. 89-100, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-89-100.

Mikhailov, M.V., Koveshnikov, A.V., Zelentsova, N.I., Illarionova, E.V., Vaskov, S.Yu. (2024) Dynamics of the carbon dioxide emission factor from ethylene production in Russia in 1990-2022, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXV, no. 1-2, с. 89-100, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-89-100.

**Актуализация оценок выбросов парниковых газов
от автомобильного транспорта в национальном кадастре
за 2010-2021 гг.**

В.М. Лытов^{1,2)}, Ю.В. Трофименко²⁾, В.А. Гинзбург¹⁾, А.Н. Якубович²⁾,
С.В. Шелмаков²⁾, Д.А. Деянов²⁾, Е.В. Шашина²⁾, М.С. Зеленова¹⁾,
С.М. Зайнулин^{1,3)}*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля,
Россия, 107058, Москва, ул. Глебовская, 20Б

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

³⁾ ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 65 кор. 1

*Адрес для переписки: vladislav_lytoff@igce.ru

Реферат. В соответствии с Руководящими принципами МГЭИК, для расчета выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта по 3 уровню оценки (наиболее подробный метод), необходимо использовать специальные модели выбросов или «транспортные модели» с детализированными данными по автомобильному парку страны. В ходе работы обобщена информация о структуре автопарка Российской Федерации по ряду параметров, таких как экологические классы автомобилей, виды потребляемого топлива, возраст, удельные нормы расхода топлива, годовые пробеги в соответствии с национальными условиями эксплуатации. Структуризация данных включала в себя подготовку специальной реляционной базы данных с характеристиками отдельных автотранспортных средств, находящихся в автомобильном парке Российской Федерации в период 2010-2021 гг. На ее основе разработана классификация совокупности всех автотранспортных средств, в результате чего удалось сформировать 206 расчетных модельных групп (классов), которые используются в качестве входных данных программы COPERT 5 для оценки выбросов парниковых газов. Корректно учитываемая детализация автопарка сокращает неопределенности при оценке итоговых валовых выбросов парниковых газов, что особенно важно при оценке статистической однородности временных рядов выбросов. Кроме того, детализированная структура автопарка увеличивает чувствительность кадастра к мерам по регулированию выбросов парниковых газов автомобильным транспортом и расширяется сферу практического использования полученных результатов. Важным результатом данной работы является уточнение статистических данных по потреблению моторного топлива автотранспортными средствами, используемых при оценке выбросов CO₂ в Национальном Кадастре. Пока-

зано, что для большинства моторных топлив наблюдается удовлетворительная сходимость топливной статистики (за исключением дизельного топлива), которая ранее использовалась при оценке выбросов диоксида углерода.

Ключевые слова. Парниковые газы, структура автопарка, инвентаризация, удельные нормы расхода топлива, среднегодовые пробеги, экологический класс автомобильного транспорта, виды моторного топлива.

Updating estimates of greenhouse gas emissions from road transport in the national inventory for 2010-2021

V.M. Lytov^{1,2)}, Yu.V. Trofimenko²⁾, V.A. Ginzburg¹⁾, A.N. Yakubovich²⁾,
S.V. Shelmakov²⁾, D.A. Deyanov²⁾, E.V. Shashina²⁾, M.S. Zelenova¹⁾,
S.M. Zainulin^{1,3)}*

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

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

³⁾ National University of Oil and Gas «Gubkin University»,
65/1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation

*Correspondence address: vladislav_lytoff@igce.ru

Abstract. In accordance with the IPCC Guidelines, to calculate GHG emissions from road transport using tier 3 methodology (the most detailed method), it is necessary to use special emission models or «transport models» with detailed data on the country's car fleet. In the course of the work, information on the structure of the Russian Federation's fleet was summarized according to a number of parameters, such as ecological classes of cars, types of fuel consumed, age, specific fuel consumption rates, annual mileage in accordance with national operating conditions. The data structuring included the preparation of a special relational database with the characteristics of individual vehicles in the automobile fleet of the Russian Federation in the period from 2010-2021. On its basis, a classification of the totality of all vehicles was developed, as a result of which 206 calculated model groups (classes) were formed, which are used as input data of the COPERT 5 program for estimating greenhouse gas emissions. Correctly taken into account the detailing of the fleet reduces uncertainties in the assessment of total gross GHG emissions, which is especially important when assessing the statistical uniformity of time series of emissions. In addition, the detailed structure of the fleet increases the sensitivity of the inventory to measures to regulation of GHG emissions by road transportation and expands the scope of practical use of the results obtained. An important result of this work is the clarification of statistical data on motor fuel consumption by motor vehicles used in the assessment of CO₂ emissions in the National Inventory. It is shown that for most motor fuels there is a satisfactory convergence of fuel statistics (with the exception of diesel fuel), which

was previously used in estimating carbon dioxide emissions.

Keywords. Greenhouse gases, fleet structure, inventory, specific fuel consumption rates, average annual mileage, ecological class of motor transport, motor fuels.

Введение

Существует достаточное количество работ, целью которых является исследование выбросов от автотранспорта в крупных городах или загрязненных определенных территорий, где в качестве основных материалов используется данные об интенсивности движений и количестве проезжающих автомобилей (например, Аргучинцева и др., 2013; Егорова и др., 2014; Пепина, Созонтова, 2017; Donchenko et al., 2016). В данной работе поставлена оригинальная и более масштабная задача – оценка выбросов парниковых газов (ПГ) на всей территории Российской Федерации, что требует определенно других подходов.

Оценка выбросов ПГ от автомобильного транспорта на национальном уровне в соответствии с Руководящими принципами (МГЭИК, 2006) в своем базовом представлении основывается на двух независимых подходах: нисходящем (уровень 1, 2) и восходящем (уровень 3) (рис. 1.).

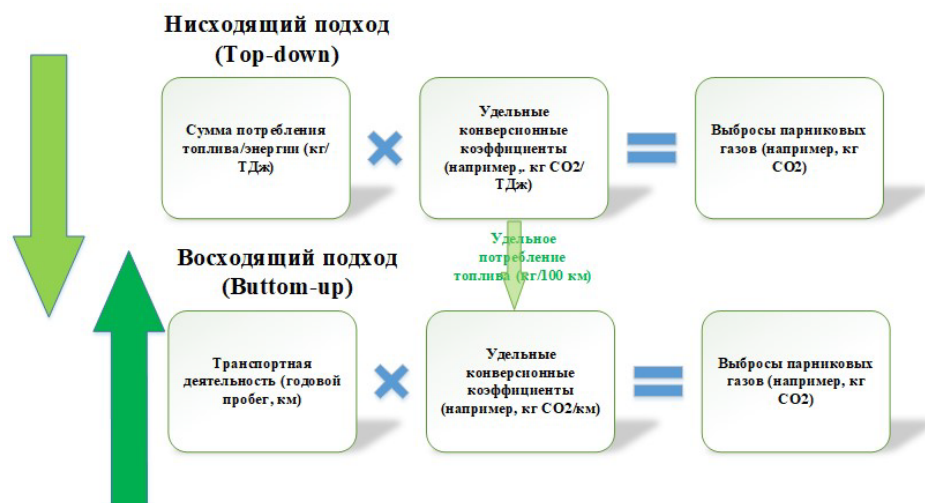


Рисунок 1. Оценки выбросов ПГ (на примере CO₂) с использованием восходящего и нисходящего подходов

Figure 1. Estimates of GHG emissions (using the example of CO₂) using bottom-up and top-down approaches

Нисходящий подход основывается на статистических данных о конечном потреблении моторных видов топлива. Восходящий подход использует данные о транспортной деятельности автомобильного парка страны, т.е. данные о численности и структуре автомобильного парка, среднегодовых пробегах автомобилей, удельных нормах расхода топлива и коэффициентах пробеговых выбросов. Эффективная практика заключается в сравнении нис-

ходящего и восходящего подходов, анализе любых различий и выявлении того, какие данные отличаются более высоким качеством.

Существующая в настоящий момент проблема учета выбросов ПГ от автомобильного транспорта в Национальном кадастре связана с отсутствием требуемой детализации данных для применения восходящего подхода (детальная структура парка транспортных средств по видам топлива и экологическим классам, нормы расхода топлива, средневзвешенные пробеги и др. параметры). Оценка выбросов по восходящему подходу должна подтверждать или уточнять текущую топливную статистику, которая используется при расчетах выбросов по нисходящему подходу.

Ряд исследователей формируют на основе доступных справочных материалов, коммерческих и официальных публикаций самостоятельные данные о структуре автомобильного парка или среднегодовых пробегах и используют их для других прикладных задач (Аликберова и др., 2023). Учитывая особенность и уникальность данного исследования, аналогов которого не проводилось до сих пор, анализ подобных исследований не приводится в работе.

Руководящие принципы (МГЭИК, 2006) для оценки выбросов ПГ (CH_4 , N_2O и основных газов прекурсоров – CO , NO_x , NMVOC) автомобильным транспортом по восходящему подходу (уровень 3) рекомендуют использовать методику ЕМЕП/ЕАОС (ЕМЕР/ЕЕА, 2019), которая реализована в виде компьютерной программы COPERT 5 (Emisia: COPERT 5, 2023). Для оценки выбросов CO_2 необходимо использовать нисходящий подход (уровень 1, 2), в то время как программа COPERT используется только для уточнения расхода топлива парком автотранспортных средств (АТС) на основании данных об их эксплуатационных характеристиках и структуре парка.

Существует достаточно большой объем статистической, аналитической и экспертной информации о структуре автопарка РФ, нормах расхода топлива и средних пробегах по типам транспортных средств, но отсутствует единая система сбора и обработки исходной информации о функционировании автомобильного парка в детализации, необходимой для достоверной оценки выбросов ПГ от транспортной деятельности с использованием восходящего подхода. Поэтому необходимо разработать методы для преобразования набора разрозненных данных в единую информационную систему, адаптированную к требованиям по полноте и детализации данных, предъявляемых для подготовки Национального кадастра парниковых газов.

Цель данной работы – актуализация оценки выбросов ПГ Российской Федерацией от автомобильного транспорта в период с 2010-2021 гг., а также анализ основных статистических данных о потреблении моторных топлив в стране и данных о транспортной деятельности автомобильного парка в данном периоде.

Кроме того, работа посвящена оценке связанности обоих подходов и проверке их на непротиворечивость, что является важным правилом при принятии решений для включения оценок выбросов ПГ в Национальный кадастр.

Уточнение топливной статистики и топливных «балансов» является ключевым аспектом в части методологического обеспечения разработки Национального кадастра, без которого невозможно проводить инвентаризацию выбросов всего сектора «Энергетика».

Материалы и методы расчетов

Для оценки выбросов ПГ от автомобильного транспорта по восходящему подходу на макроуровне (например, для страны или региона) применяется детальное моделирование с использованием определенных входных параметров. Для оценки выбросов ПГ автомобильным парком Российской Федерации с 2010-2021 гг. учитывались следующие основные параметры, требующиеся для расчета выбросов в программе COPERT 5:

1. структура автомобильного парка;
2. среднегодовые пробеги транспортных средств;
3. удельные нормы расхода топлива.

Структура автомобильного парка

В настоящее время статистика по автомобильному парку РФ представлена двумя основными базами данных (БД): форма федерального статистического наблюдения ГИБДД (Форма 1-БДД «Сведения о состоянии безопасности дорожного движения») – основной официальный источник; и БД аналитического агентства «Автостат¹⁾», доступная на коммерческой основе. Каждая из этих баз имеет свои преимущества и недостатки.

Форма 1-БДД представляет официальную статистическую информацию, собираемую на регулярной основе, но в ней отсутствует информация о виде используемого жидкого нефтяного топлива (бензина или дизельного топлива) всеми типами зарегистрированных АТС; около 30% численности АТС в БД имеют неустановленный экологический класс; отсутствует информация о возрасте АТС с разбивкой по годам о рабочем объеме двигателя внутреннего сгорания (ДВС) отдельных моделей легковых АТС, полной массе легких коммерческих, грузовых АТС, автобусов.

Данные агентства «Автостат» более детально описывают автомобильный парк, сгруппированный до уровня модификаций АТС, характеризующихся уникальным сочетанием признаков (тип, марка, модель АТС, год выпуска, кузов, вид топлива, рабочий объем двигателя, экологический класс и т. д.). Однако, в БД «Автостат» есть ряд пропусков данных в отношении классов ТС и других атрибутов, что требует корректного восстановления пропущенных данных.

Одной из основных задач работы являлось расширение структуры автомобильного парка, приведенной в форме 1-БДД под требования программы COPERT с разделением по основным показателям (численность АТС по типу,

¹⁾ Агентство Автостат, 2023 – URL: <https://www.autostat.ru/> (дата обращения 23.11.2023)

возрасту, полной массе, экологическому классу, виду используемого топлива, удельному расходу топлива, среднегодовым пробегам и другим).

В программе COPERT представлено более 800 модельных групп европейского парка автомобилей. Для ряда стран (в том числе, России) данное количество групп избыточно и не актуально при анализе национального автомобильного парка. Так в России:

- не используется этанол E85, водород и планов на развитие этих направлений не озвучено;
- не применяются экологические классы ECE 15/00-01, ECE 15/02, ECE 15/03, ECE 15/04, Improved Conventional, Open Loop;
- не применяются экологические классы Euro 6: d-temp, d и Euro VI D/E;
- не используются сочленённые междугородные автобусы.

В результате, реальное количество модельных групп АТС, свойственных для парка Российской Федерации, сокращается до 206.

Трансформация сведений об АТС в БД ГИБДД (форма 1-БДД) в классификацию 206 модельных групп (классов) АТС в COPERT 5 потребовала разработки специальной реляционной базы данных всех одиночных АТС, находящихся в автомобильном парке РФ с 2010-2021 гг. Более подробно о реляционной базе данных, методах восстановления пропущенных данных и формировании модельных групп содержится в работе (Trofimenko et al., 2023).

При этом оценка согласованности (непротиворечивости) баз данных ГИБДД и агентства «Автостат» по требуемым для COPERT классификационным признакам легковых автомобилей, легких коммерческих автомобилей, грузовых автомобилей, автобусов, мототехники осуществлялась по двум направлениям:

- установление (уточнение) корреляционных зависимостей между показателями и характеристиками отдельных марок, моделей, групп, типов АТС, уточнение значений других показателей, используемых в COPERT, выявление достоверных трендов отдельных показателей во времени;
- разработка алгоритма и методов корректировки сведений при включении их в реляционную базу данных по всем одиночным АТС, находившимся в автомобильном парке в период с 2010 по 2022 гг. и выполнение их кластеризации в расчётные модельные группы COPERT.

Среднегодовые пробеги транспортных средств

Среднегодовые пробеги транспортных средств в данной работе оценивались с помощью БД сайтов объявлений о продаже автомобилей. Такие сайты содержат удобные фильтры поиска по базе, с помощью них можно идентифицировать автомобили как по типу, так и по объему двигателя, полной массе и другим показателям.

Для определения среднегодовых пробегов транспортных средств различных классов формировались матрицы, в которых оценивались 150 объявлений о продаже заданного типа транспортного средства за каждый год в период с 2003 по 2018 гг.

Анализ данных о пробегах проводился для следующих групп АТС: легковые АТС, объём ДВС от 0.8 л до 1.4 л (PC Mini и PC Small); легковые АТС, объём ДВС от 1.4 л до 2.0 л (PC Medium); легковые АТС, объём ДВС от 2.0 л (PC Large); лёгкие коммерческие грузовики, полной массой не более 3.5 т (LCV); тяжёлые грузовые автомобили полной массой 3.5...7.5 т (HDT Rigid < 7.5 t); тяжёлые грузовые автомобили полной массой 14...28 т (HDT Rigid 14-28 t); тяжёлые грузовые автомобили полной массой свыше 32 т (HDT Rigid > 32 t); седельные тягачи полной массой 40...60 т (HDT Articulated 40-60 t); городские автобусы полной массой свыше 3.5 т (Urban Buses); туристические автобусы полной массой свыше 3.5 т (Coaches); мототехника (Moto).

В результате обработки полученного массива информации для каждой i -той расчётной группы АТС вычислялся среднегодовой пробег по формуле (1):

$$D_i = (e_i \cdot A_i + f_i) \cdot (a_i \cdot A_i^3 + b_i \cdot A_i^2 + c_i \cdot A_i + d_i), \quad (1)$$

где: D_i – среднегодовой пробег i -той расчётной группы АТС, тыс. км;

A_i – средний возраст i -той расчётной группы АТС в парке, лет;

$a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$ – к-ты регрессии зависимости среднегодового пробега i -той расчётной группы АТС от её среднего возраста.

Примеры изменения итоговых среднегодовых пробегов АТС для некоторых расчётных модельных групп представлены на рис. 2 и 3.

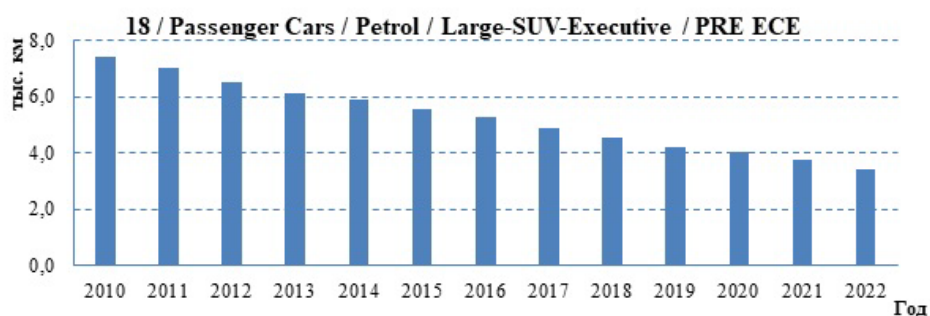


Рисунок 2. Изменение итогового среднегодового пробега для группы Passenger Cars / Petrol / large-SUV-Executive / PRE ECE, тыс. км/год

Figure 2. Change in average annual mileage for Passenger Cars / Petrol / large-SUV-Executive / PRE ECE group, thousand km/year

На основе обработки результатов данных кумулятивных и годовых пробегов АТС по всем 206 расчётным группам в табл. 1 представлены значения среднегодовых пробегов укрупнённых групп АТС в БД COPERT, которые используются в дальнейшем исследовании для оценки выбросов ПГ.

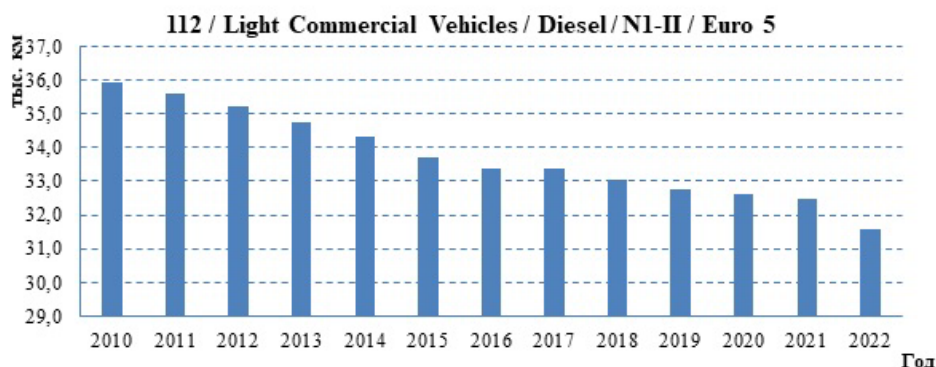


Рисунок 3. Изменение итогового среднегодового пробега для группы Light Commercial Vehicles / Diesel / N1-II / Euro 5, тыс. км/год

Figure 3. Change in average annual mileage for the Light Commercial Vehicles / Diesel / N1-II / Euro 5 group, thousand km/year

Таблица 1. Значения среднегодовых пробегов АТС (км/год), рекомендуемых COPERT и принятых в настоящем исследовании

Table 1. Values of annual mileages (km per year) recommended by COPERT and accepted in this study

Группа (категория) АТС	Рекомендации COPERT	Принимаемые в работе
Легковые автомобили	11000...21000	14650...17750
Легкие коммерческие автомобили	16000...20000	36000
Тяжелые грузовики	40000...80000	47200...125000
Автобусы	40000...70000	64000...87000
Мототехника	3000...5500	8200

Удельные нормы расхода топлива

В данной работе значения удельных расходов топлива отдельных моделей и групп АТС принимаются по умолчанию из программы COPERT. Они установлены для каждой рассчитываемой категории транспортных средств, вида топлива (бензин, дизельное топливо, гибрид, сжатый природный газ (КПГ), сжиженный углеводородный газ (СУГ)), экологических классов и 4 типов движения (пиковое и внепиковое городское движение, загородное движение и движение на магистралях). Значения удельных расходов установлены в программе COPERT для АТС, находившихся в автомобильном парке одной из стран ЕС по состоянию на 2009 год, и остаются постоянными в рассматриваемом временном интервале и на последующие годы.

Одной из причин того, что в данной работе оставлены нормы расхода топлива автотранспортными средствами по умолчанию из программы COPERT является невозможность их корректировать в процессе работы с программным обеспечением (ПО) COPERT 5.

Была проведена сравнительная оценка удельных норм расхода топлив для некоторых групп автомобилей, которые учитываются в ПО COPERT (4 типа движения), с дополненными удельными нормами, установленными распоряжением Минтранса РФ (Распоряжение Минтранса ..., (2008), ред. от 30.09.2021)), которые были расширены для 3 типов движений автомобилей (городское, смешанное, загородное) (табл. 2).

Таблица 2. Результаты сравнительного анализа удельного расхода топлива легковых автомобилей, легких коммерческих грузовиков, тяжелых грузовиков и автобусов в БД COPERT и дополненных удельных пробегах, установленных распоряжением № АМ-23-р (Распоряжение Минтранса ..., (2008)) + МАДИ, л/100 км (кВт.ч/100 км) в соответствии с типами движения

Table 2. Results of a comparative analysis of the specific fuel consumption of passenger cars and light commercial trucks (PC, LCV) in the COPERT database and the database ordered by АМ-23-r+МАДИ, l/100 km (kWh/100 km)

Топливо	Тип	БД COPERT				БД по распоряжению АМ-23-р +МАДИ*		
		OP	Peak	Rural	High-way	Город	Смешанный	Загород
Бензин	Mini	4.84	7.33	4.93	5.77	8.04	6.07	6.21
ДТ		3.63	4.77	3.83	4.37	5.69	4.29	4.39
Бензин	Small	6.23	9.78	5.88	6.50	10.97	8.28	8.47
ДТ		5.47	7.97	5.09	5.56	8.37	6.32	6.47
ЭМ		16.05	14.55	18.85	26.04	22.55	17.02	17.43
Бензин	Medium	7.50	11.49	6.99	7.50	12.93	9.75	9.99
ДТ		5.47	7.97	5.09	5.56	11.66	8.8	9.01
ЭМ		16.53	14.99	19.42	26.83	22.55	17.02	17.43
Бензин	Large	9.82	15.87	8.81	9.00	19.59	14.78	15.14
ДТ		7.00	10.29	6.60	7.37	16.10	12.15	12.44
ЭМ		19.82	17.97	23.28	32.16	22.55	17.02	17.43
Бензин	LCV	9.51	15.43	7.96	8.69	24.89	20.63	21.13
ДТ		7.51	11.19	7.26	9.75	18.22	15.12	15.49
ДТ	Тяжелые грузовики (Rigid <= 7.5 t / N2)	11.02	15.30	11.59	13.04	23.92	19.76	18.51
ДТ	Тяжелые грузовики (Rigid 26-28 t / N3)	28.78	45.84	25.44	24.04	33.55	30.92	56.24
ДТ	Автобусы (Urban Buses Standard 15-18 t / M2)	11.02	15.30	11.59	13.04	17.49	14.45	13.38
ДТ	Автобусы (Coaches Standard <=18 t / M3)	28.78	45.84	25.44	24.04	37.92	34.95	63.58

Примечание: *База данных удельных расходов топлива, установленных Распоряжением № АМ-23-р, была дополнена с учетом типов движения специалистами из МАДИ.

В ПО COPERT определение удельных выбросов загрязняющих веществ и расхода топлива проводится согласно измерительному циклу New European Driving Cycle (NEDC- Новый европейский ездовой цикл), а для дополненных уточненных удельных пробегов (Распоряжение Минтранса ..., (2008)) используется испытательный цикл Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP – Всемирный гармонизированный тестовый цикл для легковых автомобилей), который по скоростным и нагрузочным режимам наиболее приближен к реальным условиям эксплуатации.

На примере нескольких автомобилей разных категорий выявлены зависимости удельного расхода топлива от средней скорости транспортного средства посредством разделения цикла на фазы Low, Medium, High, Extra High согласно циклу WLTP. На основе выявленных зависимостей производилась корректировка значения удельного расхода топлива с учетом средней скорости движения автомобилей из расчета: городской тип движения – 30 км/ч, смешанный тип – 50 км/ч, загородный тип – 70 км/ч.

Кроме того дополненные уточненные пробеги (Распоряжение Минтранса ..., 2008) учитывают возрастную структуру национального парка транспортных средств, в котором имеются модели, возраст которых составляет 20 лет и старше. Удельный расход топлива таких транспортных средств существенно больше, чем у современных моделей. Из-за наличия в автомобильном парке России значительной доли таких АТС, дополненные уточненные удельные расходы топлива из (Распоряжение Минтранса ..., 2008) в рассматриваемых модельных группах больше.

Дополнительные параметры для расчета выбросов по восходящему подходу

В работе выполнено уточнение других «дополнительных показателей», используемых в качестве исходных данных в COPERT по умолчанию и полученных для условий эксплуатации автомобильного парка в Российской Федерации. В их числе:

- природно-климатические факторы (средневзвешенные значения температур, относительной влажности с учетом численности автомобильного парка в регионах Российской Федерации);
- распределение пробегов транспортных средств по дорогам разных категорий (доля годового пробега в режимах движения АТС – городской пиковый, городской внепиковый, пригородный, магистральный). При определении данного показателя использованы данные Росстата (формы 1-ДГ²⁾, 3-ДГ (мо)³⁾, ГК «Автодор», 1-ТР (автотранспорт)⁴⁾, данные Росгосстраха, сервиса «Автокод», «Лаборатории умного вождения» (Карпенко, 2019);

2) Приказ Росстата № 519 от 26.08.2021, «Об утверждении формы федерального статистического наблюдения № 1-ДГ «Сведения об автомобильных дорогах общего пользования и сооружениях на них федерального, регионального или межмуниципального значения», URL: <https://docs.cntd.ru/document/726500073> (дата обращения 2.12.2023).

- распределение кумулятивного пробега, среднесуточная интенсивность движения на автомобильных дорогах разных категорий для всех типов АТС;
- среднегодовые скорости АТС на автомобильных дорогах разных категорий (приняты как в COPERT);
- средняя дальность поездки автомобилей разных типов установлена с использованием данных «Лаборатории умного вождения».

В расчетных оценках валовых выбросов ПГ автомобильным парком Российской Федерации и рассматриваемых регионов использованы национальные значения дополнительных показателей.

Промежуточные результаты. Сравнение подходов расчета

CO₂ – основной парниковый газ, на который приходится 98-99% результирующих выбросов в категории «1.3.3b Дорожный транспорт» в Национальном кадастре парниковых газов (НДК, 2023), кумулятивное воздействие которых выражается в CO₂-экв.

Как уже было отмечено, выбросы CO₂, в соответствии с Руководящими принципами (МГЭИК, 2006), рассчитываются по количеству сожженных/потребленных видов топлив (нисходящий подход) и с учетом установленных коэффициентов выбросов.

Для поиска противоречий или подтверждений топливной статистики было выполнено сравнение статистических данных по количеству потребленного топлива автотранспортом в стране и полученных результатов расчетных оценок потребления топлива по COPERT.

Для заданного временного интервала (2010-2021 гг.) топливная статистика (объемы потребления автомобильным транспортом разных видов моторных топлив), являющаяся основным источником данных для нисходящего подхода, представлена в источниках:

1. Росстат – Форма № 4-ТЭР «Сведения об использовании топливно-энергетических ресурсов»⁵⁾;
2. Росстат – Топливо-энергетический баланс РФ;

³⁾ Форма 3-ДГ (мо) «Сведения об автомобильных дорогах общего пользования местного значения и искусственных сооружениях на них, находящихся в собственности муниципальных образований»; URL: <https://docs.cntd.ru/document/420297288?marker=6540IN> (дата обращения 2.12.2023). Форма утратила силу с отчета по состоянию на 1 января 2016 года.

⁴⁾ Форма 1-ТР (автотранспорт) «Сведения о грузовом автотранспорте и протяженности автодорог необщего пользования», URL: <https://docs.cntd.ru/document/1303145000?marker=7D00K9> (дата обращения 2.12.2023). Форма утратила силу с отчета по состоянию на 1 января 2016 года.

⁵⁾ Приказ Росстата № 591 от 22.11.2023, «Об утверждении Указаний по заполнению формы федерального статистического наблюдения № 4-ТЭР «Сведения об использовании топливно-энергетических ресурсов», URL: <https://docs.cntd.ru/document/1304086083?marker=6540IN> (дата обращения 2.12.2023).

3. Коммерческие данные – данные ПАО «Газпром»⁶⁾;

4. Коммерческие данные – данные исследовательской Группы «Петро-маркет»⁷⁾ (ИГ «Петромаркет, 2022).

Топливо-энергетический баланс (ТЭБ) является основным достоверным и полным источником данных, на который ориентирован весь сектор «Энергетика», в том числе категория «Автомобильный транспорт» при оценке выбросов ПГ в Национальном кадастре. Однако, например, потребление сжатого природного газа не выделяется в ТЭБ, поэтому для сравнения принимаются данные ИГ «Петромаркет» и ПАО «Газпром». Дизельное топливо – единственное топливо, объем потребления которого автомобильным транспортом в ТЭБ ниже по сравнению с данными формы № 4-ТЭР, поэтому для дизельного топлива в качестве дополнительного источника информации использовались данные из формы статистической отчетности 4-ТЭР.

Результаты расчёта потребления различных видов топлива автомобильным парком РФ в программе COPERT 5 с использованием данных о структуре автомобильного парка из БД «Автостат» и восстановленной структуры формы 1-БДД в сравнении с данными топливной статистики (Топливо-энергетический баланс РФ, форма № 4-ТЭР и данные агентства ИГ «Петромаркет» и ПАО «Газпром») представлены на рис. 4.

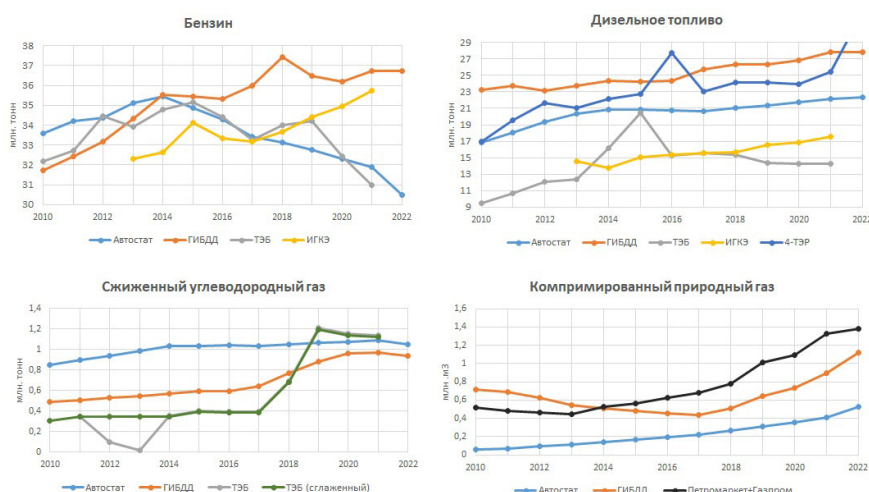


Рисунок 4. Варианты расчётной оценки годового потребления бензина, дизельного топлива, сжиженного углеводородного газа (пропан-бутана), компримированного природного газа (метана) автомобильным транспортом в РФ в период 2010-2022 гг.

Figure 4. Options for calculating the annual consumption of gasoline, diesel fuel, liquefied petroleum gas (propane-butane), compressed natural gas (methane) by road transportation in the Russian Federation in the period 2010-2022

⁶⁾ ПАО «Газпром»: Годовая отчётность. – URL: <https://www.gazprom.ru/investors/disclosure/reports/2022/> (дата обращения 3.12.2023).

⁷⁾ ИГ «Петромаркет», 2022 – Общероссийские балансы спроса и предложения углеводородного сырья и нефтепродуктов. – URL: https://www.petromarket.ru/services/web-system_access/russia_wide_supply_and_demand_balances_of_hydrocarbon_feedstock_and_petroileum_products/ (дата обращения 20.11.2023).

Для **бензина** в период до 2010 г. наблюдается хорошая сходимость результатов по разным источникам, а после 2016 г. значения годового потребления бензина по варианту «ГИБДД» больше, чем значения в ТЭБ, что связано, по-видимому, с переоценкой БД ГИБДД среднего возраста («омоложения») парка АТС и количества зарегистрированных бензиновых автомобилей в парке. Тем не менее, согласно статистике ТЭБ, более 95% бензина расходуется автомобильным транспортом, поэтому полученные результаты «ГИБДД», в дальнейшем необходимо будет корректировать путем уменьшения среднегодовых пробегов автомобилей в модельных группах COPERT.

Значения годового потребления **дизельного топлива** автомобильным парком России по варианту «ГИБДД», основанные на среднегодовых пробегах АТС во всем рассматриваемом временном диапазоне (2010-2022 гг.), существенно больше значений потребления дизельного топлива, по данным ТЭБ. При этом результаты приближены к потреблению топлива, полученные по форме 4-ТЭР.

Значения годового потребления **СУГ (пропан-бутана)** автомобильным парком России по варианту «ГИБДД» удовлетворительно коррелирует с топливной статистикой (ТЭБ). Ранее, в Национальном кадастре, для оценок выбросов по СУГ не использовался восходящий подход, и оценка выбросов основывалась только на данных ТЭБ (нисходящий подход), которые, как выяснилось, не совсем корректно отражают объемы топлива для 2012 и 2013 гг., что потребовало небольших корректировок данных (сглаживания данных в этот период согласно рис. 4).

Выбросы от сжигания **КПГ (компримированного природного газа)** в Национальном кадастре ранее не учитывались, т.к. потребление КПГ не выделяется в топливно-энергетическом балансе России, что приводило к занижению оценок в данной категории. После проведенной работы, были получены результаты потребления КПГ по восходящему подходу и нисходящему подходу (потребление согласно данным ИГ «Петромаркет» до 2014 гг. и ПАО «Газпром» после 2014 гг.), которые показывают хорошую сходимость данных.

Итоговые результаты инвентаризации

Актуализация по уточненным данным оценки выбросов парниковых газов за 2010-2021 гг. была выполнена путем корректировки среднегодовых пробегов автомобилей для сопоставления результатов с топливной статистикой. Как было выявлено ранее, для всех видов топлив (за исключением дизельного топлива) наблюдается удовлетворительная сходимость применения восходящего и нисходящего подходов. Следовательно, корректировка пробегов является необходимой мерой для уточнения результатов и сходимости подходов.

На рис. 5 приведены результаты расчётной оценки среднегодовых пробегов автомобилей в 2010-2022 гг. по программе COPERT для вариантов «Автостат», «ГИБДД» и «ГИБДД» с учетом корректировки по балансу (бен-

зин и дизель – данные ТЭБ, СУГ – сглаженный ТЭБ, КПП – до 2014 г. – ИГ «Петромаркет», после 2014 г. – ПАО «Газпром»).

Из полученных результатов следует, что для всех типов АТС значения среднегодовых пробегов в период 2010-2022 гг. без учета топливных балансов (вариант «ГИБДД») превышают значения пробегов АТС по варианту «ГИБДД с балансом». При этом среднегодовые пробеги легковых АТС близки по значениям; среднегодовые пробеги автобусов и тяжелых автомобилей по варианту «ГИБДД» больше примерно на треть, чем по варианту «ГИБДД с балансом»; разница значений среднегодовых пробегов грузовых АТС по варианту «ГИБДД» по сравнению с вариантом «ГИБДД с балансом» в некоторые годы составляет 40-50%. Это обусловлено тем, что основной вид моторного топлива для автобусов и грузовиков – дизельное топливо. По экспертным оценкам, результаты таких низких среднегодовых пробегов не могут быть «адекватными», что подтверждает еще раз предположение, что в ТЭБ объем дизельного топлива для использования автомобильным транспортом может быть заниженным.

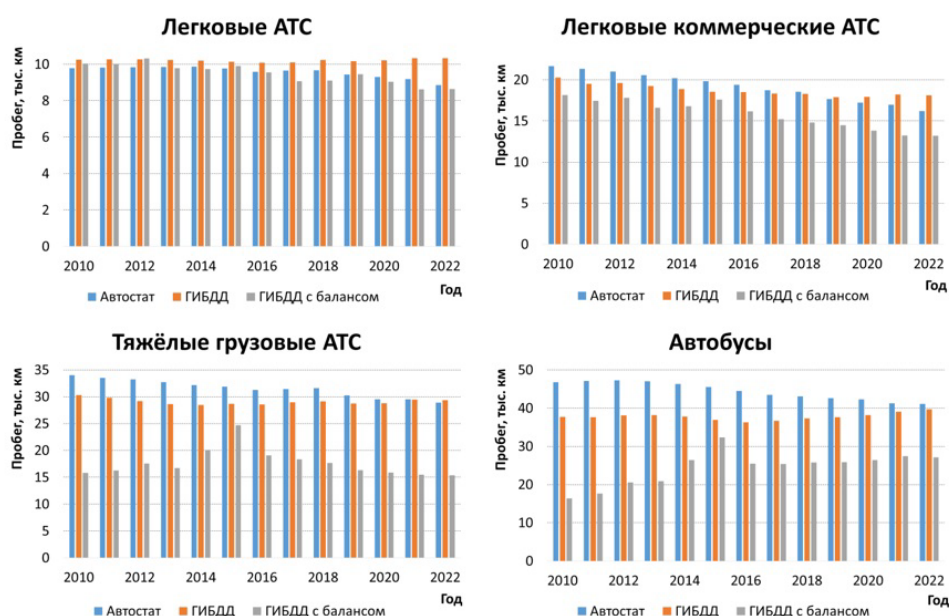


Рисунок 5. Варианты расчётной оценки среднегодовых пробегов АТС в автомобильном парке РФ («ГИБДД», «Автостат» и «ГИБДД с балансом») в 2010-2022 гг.

Figure 5. Options for calculating the average annual mileage of all type of vehicles in the Russian automobile fleet («Traffic police», «Autostat» and «Traffic police with balance») in 2010-2022

Поэтому для оценки и актуализации выбросов ПГ для 3 видов топлива (бензин, СУГ и КПП) принимаются результаты, полученные с использованием восходящего подхода со скорректированными пробегами («ГИБДД с балансом»), а для дизельных АТС – принято рассматривать результаты без внесения коррективы пробегов («ГИБДД»).

Актуализированные выбросы CO_2 от сжигания всех видов топлива и сравнение оценок с теми, что использовались ранее (НДК, 2023) представлены на рис. 6. Использовались одинаковые для обоих вариантов национальные низшие теплотворные способности топлив и коэффициенты выбросов CO_2 по умолчанию МГЭИК (бензин = 69.3 т CO_2 /ТДж; дизтопливо = 74.1 т CO_2 /ТДж; СУГ – 63.1 т CO_2 /ТДж, КППГ – 54.4 т CO_2 /ТДж).

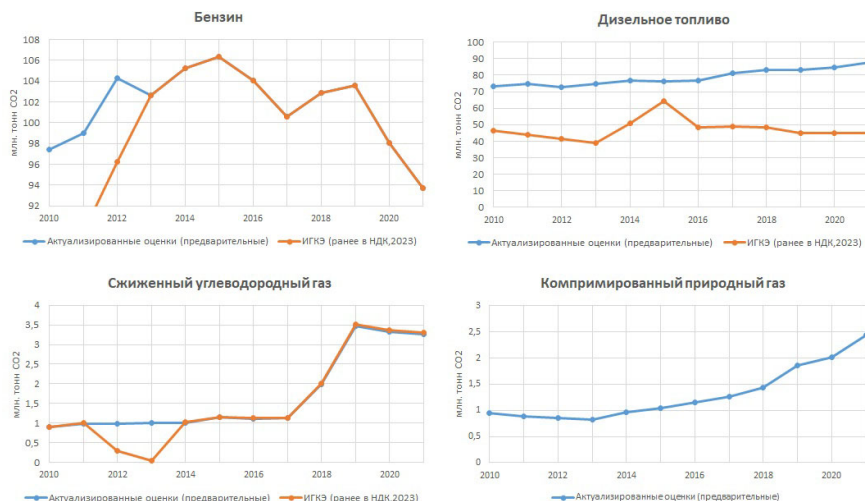


Рисунок 6. Предварительные актуализированные оценки выбросов CO_2 от сжигания ископаемых видов топлива на транспорте в сравнении с ранее используемыми в НДК, 2023

Figure 6. Preliminary updated estimates of CO_2 emissions from the combustion of fossil fuels in transport compared to those previously used in the NDI, 2023

Как видно из результатов, значения выбросов CO_2 увеличились практически для всех видов топлива на всем временном интервале (2010-2021 гг.). Выбросы от автомобилей, использующих КППГ как основной вид топлива, не учитывались ранее в Национальном кадастре, что приводило к занижению и недоучету выбросов.

Для выбросов CO_2 от сжигания бензина с 2013-2021 гг. результаты идентичны, так, как и ранее (НДК, 2023) производилась корректировка пробегов и «баланс топлива» использовался согласно данным ТЭБ. Однако, в промежутке с 2010-2012 гг., значения данных по выбросам отличаются. Связано это с тем, что данные по выбросам за 2010 год принимались согласно оценкам МАДИ по методике, в основу которой положен принцип восстановления информации на основании изучения и обобщения ретроспективных данных о численности автомобильного парка, которые были введены в (НДК, 2015), а значения за 2011-2012 гг. – это интерполяция промежуточных значений (потребление топлива). Таким образом, теперь для всего временного периода (2010-2021 гг.), оценки выбросов сопоставляются и используются согласно данным ТЭБ.

Оценки выбросов CH_4 и N_2O в большей степени зависят от экологического класса автомобилей и применяемых технологических решений (напри-

мер, использование катализатора или электронных систем управления ДВС). Сравнение оценок выбросов для этих двух ПГ по результатам данной работы с оценками, использованными ранее (НДК, 2023) представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Значения выбросов CH_4 с 2010 по 2021 гг., которые ранее использовались в Национальном кадастре (НДК, 2023; числитель) и актуализированные предварительные оценки (знаменатель), тыс. тонн CH_4 .

Table 3. Values of CH_4 emissions from 2010 to 2021, which were previously used in the National Inventory Report (NIR, 2023; numerator) and updated preliminary estimates (denominator), thousand tons of CH_4

Классы автомобилей/ годы	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Легковые автомобили	$\frac{18.1}{20.8}$	$\frac{18.9}{20.3}$	$\frac{18.9}{20.5}$	$\frac{19.3}{19.3}$	$\frac{20.3}{18.7}$	$\frac{19.5}{18.4}$	$\frac{15.8}{17.7}$	$\frac{14.1}{16.4}$	$\frac{14.5}{16.4}$	$\frac{15.5}{16.5}$	$\frac{14.4}{15.1}$	$\frac{13.6}{13.9}$
Легкие груз. автомобили	$\frac{1.7}{2.5}$	$\frac{1.8}{2.3}$	$\frac{1.9}{2.3}$	$\frac{1.9}{2.1}$	$\frac{2.0}{2.0}$	$\frac{2.0}{1.9}$	$\frac{1.9}{1.8}$	$\frac{1.8}{1.7}$	$\frac{1.8}{1.6}$	$\frac{1.9}{1.5}$	$\frac{1.7}{1.3}$	$\frac{1.6}{1.2}$
Тяжелые грузовики	$\frac{6.8}{11.2}$	$\frac{6.5}{10.6}$	$\frac{6.1}{9.7}$	$\frac{5.8}{9.0}$	$\frac{6.0}{9.0}$	$\frac{6.6}{8.6}$	$\frac{5.3}{8.4}$	$\frac{5.0}{8.1}$	$\frac{4.8}{7.9}$	$\frac{4.3}{8.2}$	$\frac{4.0}{8.1}$	$\frac{3.7}{8.4}$
Мотоциклы	$\frac{1.2}{1.4}$	$\frac{1.2}{1.2}$	$\frac{1.2}{1.1}$	$\frac{1.2}{1.0}$	$\frac{1.2}{0.8}$	$\frac{1.1}{0.7}$	$\frac{1.0}{0.7}$	$\frac{1.1}{0.7}$	$\frac{1.1}{0.7}$	$\frac{1.1}{0.7}$	$\frac{1.0}{0.6}$	$\frac{0.9}{0.6}$
ВСЕГО, тыс. тонн	$\frac{27.8}{35.9}$	$\frac{28.4}{34.5}$	$\frac{28.1}{33.6}$	$\frac{28.2}{31.3}$	$\frac{29.4}{30.5}$	$\frac{29.2}{29.7}$	$\frac{24.1}{28.6}$	$\frac{21.9}{26.9}$	$\frac{22.2}{26.4}$	$\frac{22.7}{26.8}$	$\frac{21.1}{25.1}$	$\frac{19.8}{24.1}$

Таблица 4. Выбросы N_2O с 2010 по 2021 гг., которые ранее использовались в Национальном кадастре (НДК, 2023; числитель) и актуализированные предварительные оценки (знаменатель), тыс. тонн N_2O

Table 4. Values of N_2O emissions from 2010 to 2021, which were previously used in the National Inventory Report (NIR, 2023; numerator) and updated preliminary estimates (denominator), thousand tons of N_2O

Классы автомобилей/ годы	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Легковые автомобили	$\frac{3.4}{2.0}$	$\frac{3.2}{2.0}$	$\frac{2.9}{2.0}$	$\frac{2.6}{1.9}$	$\frac{2.7}{1.9}$	$\frac{2.6}{1.9}$	$\frac{2.2}{1.8}$	$\frac{2.0}{1.7}$	$\frac{2.0}{1.7}$	$\frac{1.8}{1.7}$	$\frac{1.7}{1.6}$	$\frac{1.6}{1.5}$
Легкие груз. автомобили	$\frac{0.6}{0.5}$	$\frac{0.6}{0.5}$	$\frac{0.7}{0.5}$	$\frac{0.7}{0.5}$	$\frac{0.8}{0.5}$	$\frac{0.8}{0.5}$	$\frac{0.7}{0.5}$	$\frac{0.7}{0.5}$	$\frac{0.7}{0.4}$	$\frac{0.6}{0.5}$	$\frac{0.6}{0.5}$	$\frac{0.6}{0.4}$
Тяжелые грузовики	$\frac{1.4}{1.8}$	$\frac{1.2}{1.8}$	$\frac{1.1}{1.7}$	$\frac{0.9}{1.7}$	$\frac{1.1}{1.8}$	$\frac{1.4}{1.8}$	$\frac{1.1}{1.8}$	$\frac{1.1}{2.0}$	$\frac{1.1}{2.2}$	$\frac{1.0}{2.2}$	$\frac{1.1}{2.3}$	$\frac{1.1}{2.5}$
Мотоциклы	$\frac{0.02}{0.02}$	$\frac{0.02}{0.01}$	$\frac{0.02}{0.01}$	$\frac{0.02}{0.01}$	$\frac{0.01}{0.01}$	$\frac{0.01}{0.01}$	$\frac{0.01}{0.01}$	$\frac{0.01}{0.01}$	$\frac{0.01}{0.01}$	$\frac{0.01}{0.01}$	$\frac{0.01}{0.01}$	$\frac{0.01}{0.01}$
ВСЕГО, тыс. тонн	$\frac{5.4}{4.3}$	$\frac{5.1}{4.3}$	$\frac{4.7}{4.2}$	$\frac{4.3}{4.2}$	$\frac{4.5}{4.2}$	$\frac{4.8}{4.2}$	$\frac{4.0}{4.1}$	$\frac{3.8}{4.2}$	$\frac{3.7}{4.3}$	$\frac{3.5}{4.4}$	$\frac{3.3}{4.4}$	$\frac{3.2}{4.4}$

Дополнительно, в Национальном кадастре учитываются выбросы газов-прекурсоров, т. е. «предшественников парниковых газов» (CO, NO_x, NMVOC). В табл. 5 представлены актуализированные данные оценки вклада каждого газа-прекурсора в общий кумулятивный эффект в период 2010-2021 гг.

Таблица 5. Выбросы газов-прекурсоров с 2010 по 2021 гг., которые ранее использовались (НДК, 2023; числитель) и актуализированные предварительные оценки (знаменатель), тыс. тонн

Table 5. Values of precursors emissions from 2010 to 2021, which were previously used in the National Inventory Report (NIR, 2023; numerator) and updated preliminary estimates (denominator), thousand tons

Выбросы прекурсоров/годы	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
CO	$\frac{5\,155}{8\,765}$	$\frac{5\,093}{8\,257}$	$\frac{4\,975}{7\,996}$	$\frac{4\,813}{7\,216}$	$\frac{4\,784}{6\,750}$	$\frac{4\,450}{6\,469}$	$\frac{3\,291}{6\,057}$	$\frac{2\,725}{5\,439}$	$\frac{2\,547}{5\,096}$	$\frac{2\,416}{4\,921}$	$\frac{2\,172}{4\,284}$	$\frac{1\,965}{3\,722}$
NO _x	$\frac{922}{1183}$	$\frac{873}{1135}$	$\frac{816}{1072}$	$\frac{765}{1012}$	$\frac{834}{984}$	$\frac{914}{951}$	$\frac{677}{918}$	$\frac{617}{888}$	$\frac{597}{857}$	$\frac{551}{835}$	$\frac{511}{790}$	$\frac{481}{760}$
NMVOC	$\frac{501}{787}$	$\frac{500}{743}$	$\frac{495}{714}$	$\frac{487}{651}$	$\frac{477}{617}$	$\frac{448}{589}$	$\frac{341}{555}$	$\frac{291}{503}$	$\frac{273}{476}$	$\frac{256}{460}$	$\frac{231}{407}$	$\frac{210}{359}$

Дискуссия

Программное обеспечение для моделирования выбросов транспортных средств COPERT 5 широко применяется в Национальных кадастрах ряда стран Европы и других развитых стран. Между тем, практическое использование данной программы сдерживается необходимостью сбора большого объема конструкционных, технико-эксплуатационных, дорожных, природно-климатических и других значимых показателей, используемых в COPERT в качестве входных данных. Для этих целей были разработаны специальная реляционная база данных и методы по формированию модельных групп по имеющимся БД «Автостат» и формы 1-БДД. Корректно учитываемая детализация автопарка сокращает неопределенности при оценке итоговых валовых выбросов, что особенно важно при оценке статистической однородности временных рядов выбросов.

Эффективная практика заключается в сравнении нисходящего и восходящего подходов, анализе любых различий и выявлении того, какие данные отличаются более высоким качеством.

Результаты отклонения расчетных значений потребления моторных топлив от статистических данных за период с 2010-2021 гг. приведены в табл. 6.

В качестве основных источников информации для топливной статистики принимались следующие источники: Бензин – ТЭБ; ДТ – ТЭБ, КПП – данные ИГ «Петромаркет» до 2014 гг. и ПАО «Газпром» после 2014 гг. (в ТЭБ – отсутствует потребление данного вида топлива); СУГ – ТЭБ со скорректированными данными для 2012 и 2013 г.

Таблица 6. Отклонение расчетных значений потребления моторных топлив от статистических данных за период с 2010-2021 гг., %

Table 6. Deviation of calculated values of motor fuel consumption from statistical data for the period from 2010-2021, %

Виды топлива / Форма статистики	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Бензин / ТЭБ	-1.5	-0.9	-3.7	1.2	2.2	0.8	2.7	8.3	10.1	6.6	11.7	18.7
ДТ / ТЭБ	145.3	123.3	91.	92.8	50.8	18.6	59.1	65.6	71.8	84.4	87.9	95.1
КПП / ИГ Петромаркет + Газпром	58.1	48.7	54.2	59.6	64.9	50.7	54.8	66.0	2.3	-26.4	-15.7	-13.7
СУГ /скорр. ТЭБ	27.9	29.5	26.0	17.8	-2.8	-16.7	-38.2	-56.9	-53.7	-571.	-49.1	-48.6

В результате проведенной работы показано, что наилучшая сходимость для двух подходов наблюдается для автомобильного бензина, однако после 2017 г. отмечается небольшое отклонение. Отклонение КПП и СУГ более существенно и имеет более широкий диапазон (в среднем от -18% до + 52% для КПП и от -40% до 25% для СУГ) на всем временном периоде. Это может быть связано с тем, что в России часть автомобилей эксплуатируется с незарегистрированным газобаллонным оборудованием и в БД ГИБДД не отражаются. Однако, количество таких автомобилей в парке РФ относительно невелико.

Наибольшее отклонение от топливной статистики наблюдается для дизельного топлива. В среднем для всего рассматриваемого временного периода расчетное потребление по восходящему подходу выше данных ТЭБ на 82%. Это может свидетельствовать о заниженных данных потребления дизельного топлива в ТЭБ или быть связано с особенностью структуры российского автопарка и методологии составления ТЭБ⁸⁾. Дизельное топливо активно используется сельскохозяйственной техникой, строительной техникой, горной техникой и в жилищно-коммунальном хозяйстве. В дальнейшем планируется уточнение данных фактов, а также разработка методов по расчету и внедрению в Национальный кадастр категории «Внедорожная техника».

Учитывая особенность и уникальность данного исследования, аналогов которого не проводилось до сих пор, анализ подобных исследований не приводится в работе. Однако, результаты данной работы могут быть актуальны для ряда стран, имеющих недостаток репрезентативности данных в государственных системах учета транспортных средств и стремящихся учитывать

⁸⁾ Приказ Росстата № 229 от 4.04.2014 года, «Об утверждении официальной статистической методологии составления топливно-энергетического баланса российской федерации», URL: <https://docs.cntd.ru/document/499089559> (дата обращения 3.12.2023).

выбросы парниковых газов по 3 уровню расчетов согласно руководящим принципам МГЭИК (МГЭИК, 2006).

Выводы

По результатам работы были представлены предварительные оценки выбросов основных ПГ (CO_2 , CH_4 , N_2O) и газов-прекурсоров (CO , NO_x , NMVOC) от автомобильного транспорта в период 2010-2021 гг. Для всех типов автомобилей (за исключением автомобилей на дизельном топливе) выбросы CO_2 были оценены с использованием нисходящего подхода. Для оценки выбросов остальных ПГ от деятельности автотранспорта – применялся восходящий подход, при этом соблюдалось условие чтобы данные по топливу были эквиваленты для двух подходов для отчетности по выбросам. Так как информация о среднегодовых пробегах является наиболее неопределенной величиной из всех параметров, возникала необходимость в ее корректировке для сведения со статистикой по топливу. Однако для дизельного топлива такая корректировка не производилась, так как результаты таких низких среднегодовых пробегов не могут быть «адекватными» по экспертным оценкам.

В результате актуализации оценок выбросов ПГ от автомобильного транспорта в Национальном кадастре за 2010-2021 гг., значения выбросов в среднем ежегодно увеличились на 24% относительно предыдущих оценок (НДК, 2023).

Одной из возможных причин полученных расхождений могут являться существенные различия в классификациях АТС по типу ГИБДД и COPERT, что вносит погрешность в результаты средневзвешенных оценок удельного расхода топлива при перегруппировке АТС и влияет на достоверность расчетных оценок выбросов ПГ автомобильным транспортом.

Апробация и внедрение итоговых результатов в Национальный кадастр, а также снижение расхождений в суммарных расходах топлив, полученных по различным подходам, запланированы на 2024 год. В дальнейшем представляется целесообразным отказаться от использования программы COPERT при расчетной оценке выбросов ПГ автомобильным транспортом в Национальном кадастре ПГ и внедрить национальную методику на базе использования специфичных для автопарка РФ удельных расходов топлива АТС.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 г. №3240-р «Об утверждении инновационного проекта «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» в ходе реализации научно-исследовательской работы по теме «Актуализация распределения автомобильного парка России по видам топлива и экологическим классам, определения расхода топлива, средневзвешенных пробегов автотранспортных средств разных классов для автопарка

Российской Федерации» по договору № 32312317348 от 17 мая 2023 г. ООО «ЦТИ».

Список литературы:

Аликберова, Т.Г., Белик, И.С., Стародубец, Н.В. (2023) Адаптация транспортного сектора к процессам декарбонизации в России, *Международный научно-исследовательский журнал*, № 8 (134), с. 1-16.

Аргучинцева, А.В., Аргучинцев, В.К., Новикова, С.А. (2013) Оценка загрязнения воздушной среды г. Иркутска автотранспортом, *Известия Иркутского государственного университета. Серия: науки о Земле*, № 2, с. 47-56.

Егорова, О.С., Буркеева, Д.Р., Гоголь, Э.В., Тунакова, Ю.А. (2014) Оценка вклада автотранспортных потоков в загрязнение атмосферного воздуха г. Казани, *Вестник Казанского технологического университета*, № 16, с. 141-142.

Карпенко, К. (2019) Лаборатория Умного Вождения» выяснила, что мужчины ежедневно проезжают на 20% больше женщин, URL: <https://smartdriving.io/blog/laboratoriya-umnogo-vozhdeniya-vyyasnili-chto-muzhchiny-ezhednevno-proezzhayut-na-20-bolshe-zhenshch/> (дата обращения 1.12.2023).

НДК (2023) Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2021 гг., Москва, т. 2, с. 57-60.

НДК (2015) Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2013 гг., Москва, т. 2, с. 59-63

Пепина, Л.А., Созонтова, А.Н. (2017) Загрязнение атмосферного воздуха автомобильно-дорожным комплексом, *Alfabuild*, № 1 (1), с. 99-110.

Распоряжение Минтранса России № АМ-23-р от 14.03.2008 (2008) «О введении в действие методических рекомендаций «Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте», URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/392> (дата обращения 2.12.2023).

МГЭИК (2006) *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов*, под ред. С. Игглестона, Л. Буэндия, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе, программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов, ИГЕС, Япония, т. 1-5, URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html> (дата обращения 5.12.2023).

Форма 1-БДД «Сведения о состоянии безопасности дорожного движения», Форма федерального статистического наблюдения 1-БДД ГИБДД МВД РФ. Раздел 3. Количество автотранспортных средств, прицепов и полуприцепов к ним, стоящих на учёте, URL: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения 29.11.2023).

Donchenko, V., Kunin, Y., Ruzski, A., Mekhonoshin, V., Barishev, L., Trofimenko, Y. (2016) Estimated atmospheric emission from motor transport in Moscow based on transport model of the city, *Transportation Research Procedia*, pp. 2649-2658.

EMEP/EEA (2019) *Air pollutant emission inventory guidebook 2019*, URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019> (accessed 8.12.2023).

Emisia: COPERT 5 (2023) *Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport, prepared for the European Environment Agency*, URL: <http://www.emisia.com/copert/> (accessed 10.12.2023).

Kholod, Nazar & Evans, Meredydd & Kuklinski, T. (2016). *Russia's black carbon emissions: focus on diesel sources. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 1-27. 10.5194/acp-2016-475.

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

References

Alikberova, T.G., Belik, I.S., Starodubec, N.V. (2023) Adaptaciya transportnogo sektora k processam dekarbonizacii v Rossii [Adaptation of the transport sector to decarbonization processes in Russia], *International Scientific Research Journal*, № 8 (134), pp. 1-16.

Arguchinceva, A.V., Arguchincev, V.K., Novikova, S.A. (2013) Ocenka zagryazneniya vozduшной среды g. Irkutsk avtotransportom [Assessment of air pollution in Irkutsk by motor transport], *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: nauki o Zemle*, no. 2, pp. 47-56.

Egorova, O.S., Burkeeva, D.R., Gogol', E.V., Tunakova, Yu.A. (2014) Ocenka vклада avtotransportnyh potokov v zagryaznenie atmosfernogo vozduha g. Kazani [Assessment of the contribution of road traffic flows to atmospheric air pollution in Kazan], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, no. 16, pp. 141-142.

Karpenko, K. (2019) «Laboratoriya Umnogo Vozhdeniya» vyasnila, chto muzhchiny ezhednevno proezhayut na 20% bol'she zhenshchin [The Smart Driving Laboratory found that men drive 20% more than women every day], URL: <https://smartdriving.io/blog/laboratoriya-umnogo-vozhdeniya-vyasnila-chto-muzhchiny-ezhednevno-proezhayut-na-20-bolshe-zhenshch/> (accessed 1.12.2023).

NDK (2023) *Nacional'nyj doklad o kadaстре antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyyh gazov, ne reguliruemyyh Monreal'skim protokolom za 1990-2021 gg.* [National report on the inventory of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not

controlled by the Montreal Protocol for the years 1990-2021], Moscow, Russia, vol. 2, pp. 57-60.

NDK (2015) *Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom za 1990-2013 gg.*, [National report on the inventory of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for the years 1990-2013], Moscow, Russia, vol. 2, pp. 59-63.

Pepina L.A., Sozontova A.N. (2017) *Zagryaznenie atmosfernogo vozduha avtomobil'no-dorozhnym kompleksom* [Atmospheric air pollution by automobile and road complex], Alfabuild, no. 1(1), pp. 99-110.

Rasporyazhenie Mintransa Rossii no. AM-23-r ot 14.03.2008 [Order of the Ministry of Transport of Russia no. AM-23-r dated March 14, 2008] (2008) «O vvedenii v dejstvie metodicheskikh rekomendacij «Normy raskhoda topliv i smazochnykh materialov na avtomobil'nom transporte» [“On the implementation of methodological recommendations “Consumption standards for fuels and lubricants in road transport”], URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/392> (accessed 2.12.2023).

IPCC (2006) *Rukovodyashchiye printsipy natsional'nykh inventarizatsiy parnikovyykh gazov* [IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories], in Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (eds.), IGES, Japan, URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html> (accessed 5.12.2023).

Forma 1-BDD GIBDD MVD RF. Razdel 3. Kolichestvo avtomototransportnykh sredstv, pricepov i polupricepov k nim, stoyashchih na uchyste [Form 1-BDD “Information on the state of road safety”, Form of federal statistical observation 1-BDD of the State Traffic Safety Inspectorate of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation. Section 3. Number of motor vehicles, trailers and semi-trailers for them that are registered], URL: <http://stat.gibdd.ru/> (accessed 29.11.2023).

Donchenko, V., Kunin, Y., Ruzski, A., Mekhonoshin, V., Barishev, L., Trofimenko, Y. (2016) Estimated atmospheric emission from motor transport in Moscow based on transport model of the city, *Transportation Research Procedia*, pp. 2649-2658.

EMEP/EEA (2019) *Air pollutant emission inventory guidebook 2019*, URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019> (accessed 8.12.2023).

Emisia: COPERT 5 (2023) *Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport, prepared for the European Environment Agency*, URL: <http://www.emisia.com/copert/> (accessed 10.12.2023).

Kholod, Nazar & Evans, Meredydd & Kuklinski, T. (2016). Russia's black carbon emissions: focus on diesel sources. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 1-27. 10.5194/acp-2016-475.

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

Статья поступила в редакцию (Received): 14.12.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 23.04.2024).

Для цитирования / For citation:

Лытов, В.М., Трофименко, Ю.В., Гинзбург, В.А., Якубович, А.Н., Шелмаков, С.В., Деянов, Д.А., Шашина, Е.В., Зеленова, М.С., Зайнулин, С.М. (2024) Актуализация оценок выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта в национальном кадастре за 2010-2021 гг., *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 1-2, с. 101-123, doi: 10.21513/0207-2564-2024-1-2-101-123.

Lytov, V.M., Trofimenko, Yu.V., Ginzburg, V.A., Yakubovich, A.N., Shelmakov, S.V., Deyanov, D.A., Shashina, E.V., Zelenova, M.S., Zainulin, S.M. (2024) Updating estimates of greenhouse gas emissions from road transport in the national inventory for 2010-2021, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXV, no. 1-2, pp. 101-123, doi: 10.21513/0207-2564-2024-1-2-101-123.

**Анализ возможности уточнения «периодов полураспада»
древесной продукции для оценки запасов углерода
в заготовленных лесоматериалах**

П.Д. Полумиева, А.А. Трунов*

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

*Адрес для переписки: pollipolumieva@igce.ru

Реферат. Леса и продукция из древесины могут способствовать усилиям по смягчению последствий изменения климата, поскольку деревья являются поглотителем CO₂, а некоторые продукты из древесины могут хранить углерод в течение длительного времени. Руководящие принципы Межправительственной группы экспертов по изменению климата для расчета запасов углерода в продукции из древесины предлагают использовать метод разложения первого порядка с коэффициентами и «периодами полураспада» (“half-life”) по умолчанию. Однако значения по умолчанию не отражают национальную специфику производства и использования древесины, а также не учитывают тот факт, что модели производства древесной продукции меняются с течением времени и, соответственно, расчетные средние значения «периода полураспада» тоже будут меняться с течением времени. Все эти факторы могут привести к недооценке запасов углерода в заготовленных лесоматериалах в Российской Федерации. Цель данного исследования – анализ возможности уточнения «периодов полураспада» различных видов продукции лесной промышленности, которая является частью национальной отчетности по парниковым газам Российской Федерации в секторе «Землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство».

Ключевые слова. Парниковые газы, углерод, продукция лесозаготовки, кадастр парниковых газов, МГЭИК.

**Analysis of the possibility of refinement the “half-lives”
of wood products to assess carbon stocks
in the harvested wood products**

P.D. Polumieva, A.A. Trunov*

Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: pollipolumieva@igce.ru

Abstract. Forests and wood products can contribute to climate change mitigation efforts because trees are a CO₂ sink and some wood products can store carbon for long periods of time. The Intergovernmental Panel on Climate Change

guidelines for calculating carbon stocks in harvested forest products suggest using a first-order decomposition method with default coefficients and «half-lives». However, the default values do not reflect national specifics of wood production and use, and do not take into account the fact that timber production patterns change over time and, accordingly, the estimated average “half-lives” values will also change over time. All of these factors may lead to underestimation of carbon stocks in harvested wood products in the Russian Federation. The purpose of this study is to analyze the possibility of clarifying the “half-lives” of various types of harvested wood products, which is part of the national reporting on greenhouse gases of the Russian Federation in the sector “Land use, land-use changes and forestry”.

Keywords. Greenhouse gases, carbon, timber products, greenhouse gas inventory, IPCC.

Введение

Целью данного исследования является анализ возможности уточнения «периода полураспада» различных видов продукции лесной промышленности, которая является частью национальной отчетности по парниковым газам Российской Федерации в секторе «Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство» (ЗИЗЛХ).

Продукция из заготовленных лесоматериалов (ЗЛМ) начала рассматриваться как средство связывания углерода во второй период действия обязательств Киотского протокола (2013-2020 гг.). На конференции ООН по изменению климата в 2011 г. в Дурбане (Австралия) было принято решение 2/СМР.7, касающееся ЗЛМ, в котором каждая Сторона, включенная в Приложение I, обязана отчитываться за углерод, хранящийся в этом пуле.

Рассмотрение продукции лесозаготовок в качестве механизма накопления углерода является относительно новым, хотя существуют исследования, которые признают, что ЗЛМ могут сокращать выбросы углерода и вносить вклад в стратегии смягчения последствий изменения климата (Steel, 2021). Углерод хранится в ЗЛМ до тех пор, пока они находятся в использовании или в утилизации. Таким образом, накопление углерода в ЗЛМ вносит вклад в общий баланс лесной биомассы. Тем не менее, до сих пор не хватает надежной и исчерпывающей информации для количественной оценки функции ЗЛМ по накоплению углерода (Steel, 2021). Несмотря на то, что были предложены различные подходы к учету, хранение углерода в ЗЛМ рассматривается в основном для национальной отчетности по парниковым газам и с помощью подходов, предложенных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), которая, в свою очередь, имеет ряд ограничений и недостатков, которые будут рассмотрены далее.

Методы, применяемые для оценки накопления углерода в ЗЛМ

Руководящие принципы МГЭИК (МГЭИК, 2006) описывают методы, т. е. так называемые уровни (Tier), для оценки накопления углерода в ЗЛМ.

Уровни в основном различаются наличием данных о деятельности и уровнем агрегирования ЗЛМ. Последние Руководящие принципы МГЭИК (IPCC, 2019) содержат следующие уровни:

- На Уровне 1 предполагается, что углерод в ЗЛМ окисляется в год лесозаготовки. Таким образом, этот подход делает упрощенное предположение об отсутствии накопления углерода в пуле ЗЛМ.

- Метод Уровня 2 требует оценки пула углерода ЗЛМ и его изменений для трех стандартных категорий ЗЛМ с использованием метода затухания первого порядка с применением коэффициентов по умолчанию.

- Метод Уровня 3 предусматривает оценку углеродного пула ЗЛМ и его изменений с использованием значений «периода полураспада» для конкретной страны и/или национальных методологий учёта.

Руководство МГЭИК (IPCC, 2019) включает четыре основных подхода к учету накопления углерода в ЗЛМ: подход «изменение запасов», «производственный» подход, подходы «атмосферный поток» и «простое разложение». Все перечисленные подходы отличаются по следующим параметрам:

- 1) Основная концептуальная основа. Первая концепция основывается на оценке изменений в запасах углерода в пределах определенных пулов ЗЛМ и требует отслеживания изменений в запасах углерода в пуле ЗЛМ, которые происходят из года в год, а затем получения чистых выбросов и абсорбции CO_2 от ЗЛМ за счет изменения этих запасов. Вторая концепция направлена на выявление и количественную оценку фактических потоков CO_2 из пула ЗЛМ в атмосферу.

- 2) Системные границы, применяемые при расчете хранения углерода, которые не обязательно аналогичны национальным границам стран.

Подход «изменение запасов» и «производственный» подход основаны на первой концептуальной основе, а подходы «атмосферный поток» и «простое разложение» – на второй концептуальной основе (IPCC, 2019). Первые два подхода учитывают изменения запасов в пулах углерода биомассы, тогда как последние два учитывают потоки углерода в атмосферу и из атмосферы. Кроме того, подходы, основанные на «изменении запасов» и «атмосферных потоках», охватывают изменения запасов или потоки CO_2 , связанные с потребляющей страной, тогда как подходы «производства» и «простого разложения» охватывают те, которые связаны со страной-производителем, независимо от того, где потребляются ЗЛМ. МГЭИК предоставляет подробную информацию о формировании данных о деятельности для каждого подхода, а также о методах расчета, используемых для оценки вклада пула ЗЛМ в общий баланс парниковых газов в секторе ЗИЗЛХ (МГЭИК, 2006; IPCC, 2014, 2019).

Метод изменения запасов оценивает чистое изменение запасов углерода в лесах и в пуле ЗЛМ в пределах национальных границ. Таким образом, изменения запасов углерода в лесах учитываются в стране, представляющей отчет, тогда как изменения запасов в ЗЛМ учитываются в стране, представляющей отчетность, в которой используются изделия из древесины, т. е. сообщается страной-потребителем. Метод изменения запасов оценивает чистые измене-

ния в запасах углерода в лесах и пулах ЗЛМ через прирост и потерю углерода. Углерод, переносимый из лесных пулов углерода в пул ЗЛМ, сначала учитывается как потеря углерода из пула лесных земель в стране, представляющей отчет, а затем как прирост углерода в пуле ЗЛМ в странах-потребителях.

«Производственный» подход также оценивает чистые изменения в запасах углерода в лесах и в пуле ЗЛМ, но в границах страны-производителя. Таким образом, пул ЗЛМ состоит из всех изделий из древесины, которые потребляются внутри страны, и тех изделий, которые экспортируются и используются в других странах. Другими словами, при применении «производственного» подхода страна-производитель сообщает об изменениях накопления углерода, независимо от того, где используются ЗЛМ. «Производственный» подход учитывает только запасы ЗЛМ внутреннего производства, а влияние импортируемой древесины не оценивается. Углерод, переносимый из пула лесной биомассы в пул ЗЛМ, сначала учитывается как потеря углерода в пуле лесных земель в стране, представляющей отчет, а затем как прирост углерода в пуле ЗЛМ страны-производителя.

Подход «атмосферного потока» оценивает потоки углерода между биосферой и атмосферой в пределах национальных границ. Поглощение углерода в результате роста лесов учитывается в стране-производителе, а выбросы углерода в результате окисления древесины или изделий из древесины учитываются в стране-потребителе. Подход с использованием «атмосферного потока» учитывает выбросы от окисления ЗЛМ по стране-потребителю, т. е. там, где они фактически происходят. Таким образом, углерод, переносимый из пула биомассы лесов в пул ЗЛМ, учитывается не как потеря углерода в пулах лесных земель в стране-производителе, а как выбросы в момент окончания срока службы ЗЛМ в стране-потребителе.

Подобно подходу «атмосферного потока», подход «простого разложения» учитывает фактические потоки углерода в атмосферу. Однако метод простого разложения охватывает выбросы CO_2 от древесины, заготовленной страной-производителем, поэтому выбросы от ЗЛМ и древесной биомассы, используемой для производства энергии, представляются страной-производителем. Таким образом, перенос углерода из лесных пулов углерода в пул ЗЛМ учитывается не как потеря углерода в пулах лесных земель страны-производителя, а как выбросы из пула ЗЛМ в момент окончания срока службы ЗЛМ в стране-производителе. Как и в подходе «атмосферный поток», требуются данные о деятельности, включая данные о сырье для переработки древесины для ее использования в качестве материала, и о древесной биомассе, сжигаемой для получения энергии.

Кроме того, в литературе описан метод изменения запасов местного происхождения – stock-changes approach for HWP of domestic origin (SCAD) (Sato, Nojiri, 2019). Однако МГЭИК не рассматривает SCAD как независимый подход (Sanquetta et al., 2019). Подход SCAD оценивает чистые изменения в запасах углерода в лесах и пулах ЗЛМ, учитывает только произведенные внутри страны ЗЛМ, потребляемые в стране-производителе, в то время как воздействие импортируемой и экспортируемой древесины не оценивается.

Изменения в углеродном пуле леса учитываются в стране, в которой выращивается древесина, т.е. в стране-производителе. Углерод, перенесенный из лесного пула углерода в пул ЗЛМ, учитывается как потеря углерода в пуле лесных площадей страны-производителя, а затем учитывается как прирост углерода в пуле ЗЛМ в стране-производителе, но только для внутреннего потребления ЗЛМ (Sato, Nojiri, 2019).

Для всех вышеперечисленных подходов применяются значения «периода полураспада» по умолчанию: 35 лет для пиломатериалов, 25 лет для древесных плит и 2 года для бумаги и картона (IPCC, 2019).

В Руководящих принципах МГЭИК понятие «периода полураспада» (“half-life”) принимается как средний срок службы древесного изделия для определения периода учета депонирования углерода в изделиях из древесины (используется для вычисления коэффициента распада $k = \ln(2)/\text{half-life}$). «Период полураспада» представляет собой время, когда половина продукции, произведенная в определенном году, т.е. полуобработанная древесная продукция, достигает конца своего срока службы. Все ЗЛМ имеют разные сроки службы и, следовательно, разные «периоды полураспада». Срок службы древесных изделий в основном определяется физическими и химическими условиями, а также социально-экономическими факторами (Pingoud, Wagner, 2006; Chang et al., 2014). Также на срок жизни древесного изделия влияет характер использования продукции, т.е. для древесных изделий, используемых в гражданском строительстве или для наружных работ, или древесных изделий для внутренней декоративной отделки или мебели будут различные физические и химические воздействия и, соответственно, различные сроки эксплуатации (Soimakallio et al., 2022). Продукция лесозаготовки имеет различное конечное использование, и ожидаемая продолжительность жизни даже в пределах одного вида продукции может существенно различаться (Soimakallio et al., 2022). Таким образом, важно понимать, как используется древесная продукция, поскольку информация о продолжительности жизни или «периоде полураспада» ЗЛМ обычно связана с конкретными функциями конечного использования.

Обзор литературных источников

Значения «периода полураспада», как правило, являются наиболее неопределенной частью расчетов запасов углерода в категории заготовленных лесоматериалов. Основная проблема заключается в отсутствии данных для оценки скорости удаления углерода из пула ЗЛМ, поскольку отсутствуют надежные данные о полном жизненном цикле ЗЛМ для различных стран (Brunet-Navarro et al., 2016). Кроме того, в литературе отсутствуют сведения о сроке службы и «периоде полураспада» для недавно появившихся продуктов на основе древесины, таких как текстиль из древесного сырья, биохимические вещества и биокompозиты, хотя их доля на рынке лесного сектора увеличивается, а некоторые из них могут составлять относительно длительное хранение углерода (Soimakallio et al., 2022).

Если рассматривать ЗЛМ с точки зрения баланса углерода в атмосфере, срок службы ЗЛМ состоит из времени использования и возможной переработки для повторного использования, а также времени, в течение которого ЗЛМ не используется, например, на свалках. Очевидно, что «периоды полураспада» различны для ЗЛМ как для полуобработанной продукции, так и для конечных продуктов. Значения «периода полураспада» ЗЛМ по умолчанию, представленные в Руководящих принципах МГЭИК (IPCC, 2019), являются результатом усреднения сроков службы различных древесных продуктов. Значения по умолчанию предназначены для применения ко всем отчитывающимся странам и являются приближенными. В действительности ключевые параметры для оценки изменения накопления углерода в ЗЛМ, такие как «периоды полураспада», коэффициенты преобразования углерода и использование материалов для производства, различаются от страны к стране (Pingoud, Wagner, 2006).

Существует ряд исследований, которые приводят оценки «периодов полураспада», отличные от значений по умолчанию МГЭИК. Так, согласно исследованиям, приведённым в работе (Skog, Nicholson, 1998), «период полураспада» для древесной продукции, использованной в строительстве деревянных односемейных домов, составляет 80-100 лет, многоквартирных домов – 70 лет, 67 лет для нежилых сооружений и 30 лет для шпал. В работе (Bird, 2013) было установлено, что реальный «период полураспада» бумажной продукции в Австрии составляет 4.6 года, что более чем в два раза превышает период полураспада по умолчанию, составляющий 2 года, как это предлагается в руководящих принципах МГЭИК. В работе (Dymond, 2012) приводится средний «период полураспада» для односемейных домов 90 лет (минимально 78 лет и максимально 350 лет), для многоквартирных домов и коммерческих зданий – 75 лет (минимально 48 лет и максимально 350 лет). Авторы (Karjalainen et al., 1994) дают период полураспада для пиломатериалов – 50 лет, для бумажной продукции от 5.3 до 7 лет. В работе (Nabuurs, 1996) для пиломатериалов «период полураспада» указан как диапазон от 18 до 45 лет в зависимости от породы дерева, из которого они сделаны. В работе (Jasinevicius et al., 2018) для пиломатериалов был принят период полураспада 45 лет, для бумажной продукции 5 лет. В работе (Profft, 2009) для строительной древесины и древесных панелей средний срок службы составлял около 50 лет. Согласно данным (Skog, 2008) период полураспада для твёрдой древесины, которая используется в строительстве односемейных домов, составляет 75 лет (для 1920-х годов и ранее) и 80 лет (для временного периода 1920-1939 гг.). В исследовании (Matsumoto et al., 2022) было установлено, что «период полураспада» деревянного дома, согласно данным японских компаний, составляет от 66 до 101 года. Согласно международным исследованиям, «период полураспада» древесины, используемой для строительства зданий и жилых домов, составляет в Германии по различным оценкам от 65 (Burschel et al., 1993) до 150 лет (Vasquez et al., 2016), 71 год в Австрии (Braun et al., 2016), 80 лет в Соединённом Королевстве Великобритании (Pingoud et al., 2003; Miatto et al., 2017), 61-100 лет в США (Kapur et al., 2008; Aktas et al., 2012), 125 лет в Норвегии (Sandberg et al., 2014).

За последние десятилетия технологические усовершенствования в деревообрабатывающей промышленности достигли высоких результатов, что привело к возможности использовать низкокачественные бревна и бревна малого диаметра, повышению эффективности переработки изделий из древесины, разработке инновационных изделий из древесины с более длительным сроком службы и увеличению степени переработки, что потенциально может привести к увеличению запасов углерода в пуле ЗЛМ (Li et al., 2022). Например, технологический прогресс в деревообрабатывающей промышленности способствовал увеличению выхода пиломатериалов до 70% для бревен малого диаметра, что еще несколько десятилетий назад было невозможно (Shmulsky, Jones, 2019). Кроме того, с изобретением и распространенным использованием изделий из древесных композитов лесопильные заводы распределяют свои отходы переработки между производителями изделий из древесины, расположенных ниже по технологической цепочке, практически не оставляя отходов (Bowyer et al., 2012). Помимо сжигания для выработки энергии, использование деревьев малого диаметра и отходов переработки для производства пиломатериалов и изделий из древесных композитов может сохранять углерод в течение более длительного периода. Инновационные изделия из древесины, такие как массивные древесные панели и жесткие изоляционные панели из древесного волокна низкой плотности, широко используются в строительных системах для замены материалов с высоким содержанием углерода из стали, бетона, кирпича и изоляции на нефтяной основе, которые могут расширить применение древесины и сокращение воплощенного углерода (Cetiner, Shea, 2018; Cabeza et al., 2021).

Кроме того, передовые технологии обработки древесины, такие как прессование и термическая обработка пиломатериалов, позволяют продлить срок службы деревянных изделий для наружного использования до 50 лет и больше (Brischke et al., 2006).

Представление отчетности по заготовленным лесоматериалам в Национальном кадастре выбросов и поглощений парниковых газов Российской Федерации

Структура лесной промышленности и цепочки движения материалов лесозаготовки в Российской Федерации в общем виде представлена на рис. 1.

Продукция лесозаготовки включена в Национальную систему инвентаризации парниковых газов Российской Федерации как одна из категорий сектора ЗИЗЛХ (НДК, 2023). В Национальном кадастре выбросов и поглощений парниковых газов Российской Федерации применяется «производственный» подход. Как уже отмечалось выше, при применении «производственного» подхода страна-производитель сообщает об изменениях запасов углерода в результате производства ЗЛМ внутри страны, независимо от того, где физически потребляются и используются ЗЛМ. Таким образом, пул ЗЛМ состоит из всех продуктов, изготовленных из древесины, которые производятся внутри страны, то есть тех продуктов, которые потребляются внутри страны, а также

тех продуктов, которые экспортируются и используются в других странах. Для расчетов используются коэффициенты и «периоды полураспада» по умолчанию, приведенные в Руководящих принципах МГЭИК (IPCC, 2019). Оценка запасов углерода в ЗЛМ приводится с 1961 года согласно методологии МГЭИК (рис. 2).

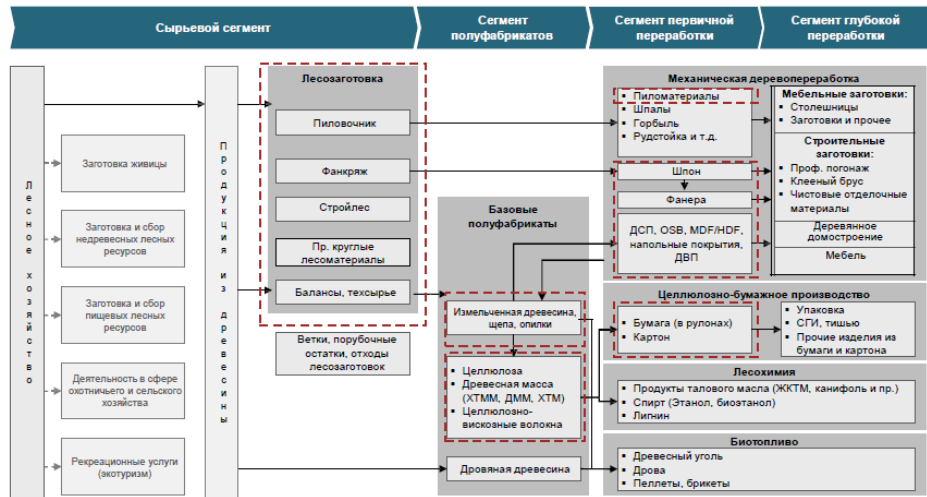


Рисунок 1. Структура лесной промышленности Российской Федерации.

Источник: исследование *What Wood* в рамках сотрудничества с FSC (Forest Stewardship Council) России, открытый доступ (<https://ru.fsc.org/preview.fsc-2016-2018.a-3141.pdf>)

Figure 1. Structure of the forest industry of the Russian Federation.

Source: *WhatWood* research in the framework of cooperation with FSC (Forest Stewardship Council) of Russia, open access (<https://ru.fsc.org/preview.fsc-2016-2018.a-3141.pdf>)

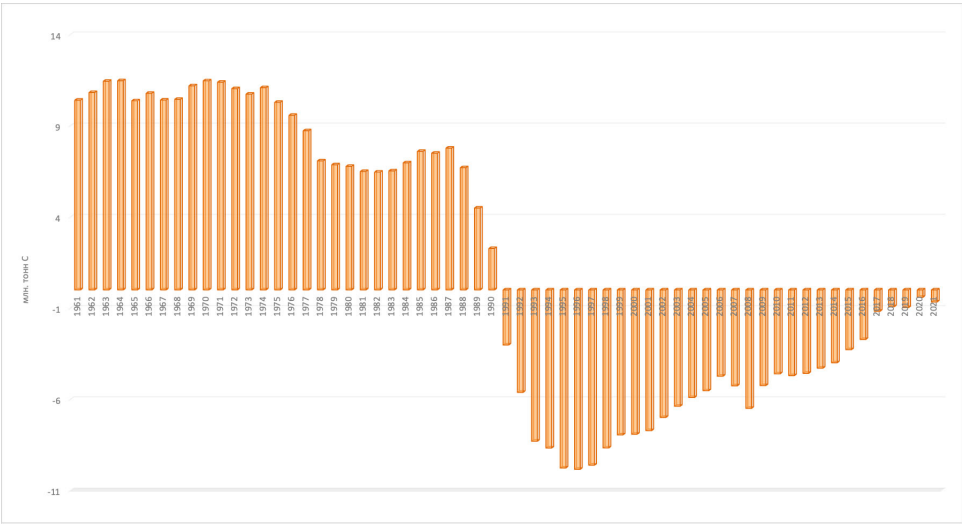


Рисунок 2. Годовое изменение запасов углерода в пуле заготовленных лесоматериалов (НДК, 2023)

Figure 2. Annual change in carbon stocks in the harvested wood product pool (NDK, 2023)

Основными факторами, влияющими на изменение запасов углерода в пуле ЗЛМ на национальном уровне, являются: внутренний уровень заготовки древесины, доли пиловочника, балансовой и древесины для энергетических целей, а также срок службы древесных изделий и их конечное использование, в том числе утилизация или переработка.

Исходными данными для расчёта баланса парниковых газов в пуле ЗЛМ являются информация, характеризующая хозяйственную деятельность лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, данные о производстве, импорте и экспорте круглого леса, пиломатериалов, фанеры, древесно-стружечные плит (ДСП), древесноволокнистых плит (ДВП) и бумажной продукции за период с 1961 г. по отчётный год Национального кадастра.

Данные по производству основных видов древесной продукции в 1961-1989 гг. были взяты из статистических ежегодников «Народное хозяйство Российской Советской Федеративной Социалистической Республики (РСФСР)», а начиная с 1990 года и по настоящее время – из «Российских статистических ежегодников» (1991-2022).

Данные по экспорту и импорту за 1961-1990 гг. были получены из ежегодных статистических сборников «Внешняя торговля СССР», за 1990-1993 гг. – из статистических ежегодников Росстата, с 1994 по настоящее время используются данные Федеральной таможенной службы (ФТС) России.

В динамике баланса углерода в пуле заготовленных лесоматериалов условно можно выделить два периода: 1961-1990 гг. и 1991 г. – по настоящее время (см. рис. 2). В период с 1961 г. по 1990г. баланс углерода отражает накопление углерода в ЗЛМ. В дальнейшем, в период с 1991 по 2021 г. пул ЗЛМ являлся нетто-источником потерь углерода. Общее ухудшение экономической ситуации в РФ в начале 1990-х годов привело к кризису в лесопромышленном комплексе, вследствие чего снизились объёмы вывоза древесины с мест заготовок (невостребованная древесина), значительно сократились объёмы производства древесной продукции и увеличился экспорт древесины и продуктов ее переработки. Отсюда можно наблюдать резкое изменение знака на графике в 1991 году. С 1996 г. наблюдается сокращение потерь углерода. Такая тенденция связана в первую очередь с увеличением производства ЗЛМ и уменьшением экспорта необработанной древесины и пиломатериалов. Однако, пул ЗЛМ по-прежнему остается нетто-источником парниковых газов и не достигает показателей докризисного периода.

Заключение

В данной работе представлен обзор литературных источников, которые приводят уточненные значения «периода полураспада» различных категорий древесной продукции на основе подробных данных по древесной продукции по конкретным странам и регионам. Как видно из приведенных в литературе исследованиях, «периоды полураспада» по умолчанию МГЭИК, которые в настоящее время используются для расчетов в Национальном кадастре,

сильно занижены. Кроме того, значения по умолчанию не учитывают тот факт, что модели производства древесной продукции меняются с течением времени и, соответственно, расчетные средние значения «периода полураспада» будут также меняться с течением времени. Хотя в Руководящих принципах (МГЭИК, 2006, том 4, глава 12, табл. 12.6) упоминалось, что «период полураспада (может) изменяться с течением времени», очень немногие исследования посвящены динамическим изменениям «периода полураспада» на национальном уровне в течение более длительного периода времени. В работе (Skog, 2008), например, использует метод Уровня 3, который включает изменение «периода полураспада» с течением времени для оценки вклада углерода ЗЛМ.

Основная проблема по оценке пула ЗЛМ и «периодов полураспада» связана, главным образом, с неопределенностью допущений в распределении ЗЛМ в каждой категории и подкатегории древесных изделий. Оценочные неопределенности для значений «периода полураспада» варьируются от $\pm 30\%$ (Donlan et al., 2012) до $\pm 50\%$ (IPCC, 2003). Повышение достоверности может быть достигнуто за счет дальнейших исследований распределения ЗЛМ по различным категориям и разработки полного набора национальных «периодов полураспада»/сроков службы для всех древесных изделий.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 г. № 3240-р «Об утверждении инновационного проекта «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Список литературы

МГЭИК (2006) *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. Подготовлены Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов.* Под ред. С. Игглестона, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара и К.Танабе, ИГЕС, Хайяма.

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

Aktas, C.B., Bilec, M.M. (2012) Impact of lifetime on US residential building LCA results, *Int. J. Life Cycle Assess*, no. 17, pp. 337-349.

Bird, D.N. (2013) The benefits of using an Austrian specific model for emissions from paperproducts, *Working paper* http://www.smartforests.at/linked/d.05_hwp_-_paper_accounting.pdf.

Bowyer, J.L., Bratkovich, D.S., Fernholz, K. (2012) *Utilization of harvested wood by the North American forest products industry*, Dovetail Partners Outlook, 22 p.

- Braun, M., Winner, G., Schwarzbauer, P., Stern, T. (2016) Apparent half-life-dynamics of harvested wood products (HWPs) in Austria, Development and analysis of weighted time-series for 2002 to 2011, *Forest Policy and Economics*, no. 63, pp. 28-34.
- Brischke, C., Bayerbach, R., Otto Rapp, A. (2006) Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products, *Wood Mater. Sci. Eng.*, no. 1, pp. 91-107, doi: 10.1080/17480270601019658.
- Brunet-Navarro, P., Jochheim, H., Muys, B. (2016) Modelling carbon stocks and fluxes in the wood product sector: a comparative review, *Glob Chang Biol*, vol. 22(7), pp. 2555-2569.
- Burschel, P., Kursten, E., Larson, B.C., Weber, M. (1993) Present role of German forests and forestry in the national carbon budget and option to increase, *Water, Air, and Soil Pollution*, no. 70, pp. 325-340.
- Cabeza, L.F., Boquera, L., Chafer, M., Verez, D. (2021) Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis, *Energy Build.*, vol. 231, 66 p., doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110612, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110612.
- Cetiner, I., Shea, A.D. (2018) Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings, *Energy Build.*, no. 168, pp. 374-384, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.019.
- Chang, Y.S., Han, Y., Park, J.H., Son, W.L., Park, J.S., Park, M.J., Yeo, H. (2014) Study on methods for determining half-life of domestic wooden panel among harvested wood products, *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, no. 42(3), pp. 309-317, doi: 10.5658/WOOD.2014.42.3.309.
- Donlan, J., Skog, K., Byrne, K. A. (2012) Carbon storage in harvested wood products for Ireland 1961-2009, *Biomass and Bioenergy*, 46, 731-738, <https://doi.org/http://10.1016/j.biombioe.2012.06.018>.
- Dymond, C. (2012) Forest carbon in North America: annual storage and emissions from British Columbia's harvest, *Carbon Balance and Management*, p. 1-20.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2003) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa Prefecture, Japan..
- IPCC (2019) *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, in Calvo Buendia, E. Tanabe, K. Kranjc, A. Baasansuren, J. Fukuda, M. Ngarize, S. Osako, A. Pyrozhenko, Y. Shermanau, P. and Federici, S. (eds), Published IPCC, Switzerland.
- IPCC (2014, 2013) *Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol*, in T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T.G. Troxler (eds.), Published IPCC, Switzerland.
-

- Jasinevicius, G., Marcus, Lindner, Emil, Cienciala, Markku, Tykkylainen (2018) Carbon Accounting in Harvested Wood Products: Assessment Using Material Flow Analysis Resulting in Larger Pools Compared to the IPCC Default Method, *Journal of Industrial Ecology, Yale University*, vol. 22(1), pp. 121-131.
- Kapur, A., Keoleian, G., Kendall, A. Kesler, S.E. (2008) Dynamic modeling of in-use cement stocks in the United States, *J. Ind. Ecol.*, no. 12, pp. 539-556.
- Karjalainen, T., Kellomaki, S., Pussinen, A. (1994) Role of Wood-based Products in Absorbing Atmospheric Carbon, *Silva Fennica*, no. 28(2), pp. 67-80.
- Li, L., Wei, X., Zhao, J., Hayes, D., Daigneault, A., Weiskittel, A., et al. (2022) Technological advancement expands carbon storage in harvested wood products in Maine, USA, *Biomass Bioenergy*, vol. 161, 26 p., doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106457.
- Matsumoto, R., Kayo, C., Kita, S. et al. (2022) Estimation of carbon stocks in wood products for private building companies, *Sci Rep.*, no. 12. pp. 1-10, doi: 10.1038/s41598-022-23112-0.
- Miatto, A., Schandl, H., Tanikawa, H. (2017) How important are realistic building lifespan assumptions for material stock and demolition waste accounts, *Resour. Conserv. Recycl.*, no.122, pp. 143-154.
- Nabuurs, G.J. (1996) *Significance of wood products in forest sector carbon balances. Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle*, NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Pingoud, K., Perälä, A. L., Soimakallio, S., Pussinen, A. (2003) *Greenhouse gas impacts of harvested wood products*, Evaluation and development of methods, VTT research notes 2189, Espoo, Finland.
- Pingoud, K., Wagner F. (2006) Methane emissions from landfills and carbon dynamics of harvested wood products: the first-order decay revisited, *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, no. 11, pp. 961-978.
- Profft, I., Mund, M., Weber, G.E., Weller, E., Schulze, E.D. (2009) Forest management and carbon sequestration in wood products, *Eur J Forest Res.*, doi: 10.1007/s10342-009-0283-5.
- Sandberg, N. H., Sartori, I., Brattebo, H. (2014) Using a dynamic segmented model to examine future renovation activities in the Norwegian dwelling stock, *Energy Build.*, no. 82, pp. 287-295.
- Sanquetta, C., Tomé, M., Dias, A., Maas, G., Sanquetta, F. and Corte, A. (2019) Carbon storage and CO₂ dynamics from wood products harvested in Brazil during 1900-2016, *Carbon Management*, no. 10(4), 417-429.
- Sato, A., Nojiri, Y. (2019) Assessing the contribution of harvested wood products under greenhouse gas estimation: accounting under the Paris Agreement and the potential for double-counting among the choice of approaches, *Carbon Balance and Management*, no. 14(1), pp. 1-19.
-

Shmulsky, R., Jones, P.D. (2019) *Forest products and wood science*. An introduction Hoboken NJ, John Wiley Sons, Inc, doi: 10.1002/9781119426400.

Skog, K. (2008) Sequestration of carbon in harvested wood products for the United States, *Forest Products Journal*, no. 58(6), pp. 56-72.

Skog, K., Nicholson, G. (1998) Carbon cycling through wood products: the role of wood and paper products in carbon sequestration, *For. Prod. J*, no. 48 (7-8), pp. 75-83.

Soimakallio, Sampo, Fehrenbach, Horst, Sironen, Susanna, Myllyviita, Tanja, Adballa, Nabil, Seppälä, Jyri (2022) Fossil carbon emission substitution and carbon storage effects of wood-based products, *Reports of the Finnish Environment Institute*, no. 22, 93 p.

Steel, E.A. (2021) *Carbon Storage and Climate Change Mitigation Potential of Harvested Wood Products*, Draft Background Paper prepared for the 61st Session of the FAO Advisory Committee on Sustainable Forest-based Industries. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Forest Products and Statistics Team, 37 p.

Vásquez, F., Løvik, A.N., Sandberg, N.H., Müller, D.B. (2016) Dynamic type-cohort-time approach for the analysis of energy reductions strategies in the building stock, *Energy Build*, no. 111, pp. 37-55.

References

MGEIK (2006) *Rukovodyashchie principy nacional'nyh inventarizacij parnikovyh gazov MGEIK 2006 g./Podgotovleny Programmoj MGEIK po nacional'nym kadastram parnikovyh gazov* [National Greenhouse Gas Inventory Guidelines Prepared by the IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme] in S. Igglestona, L. Buendia, K. Miva, T. Ngara, K.Tanabe (eds.), vol. 1-5, IGES, Hajyama.

NDK (2023) *Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov Iz istochnikov I absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov, ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom za 1990-2021 gg. v 2 tomah* [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases Not Controlled by the Montreal Protocol, 1990-2021, 2 volumes], Moscow, Russia.

Aktas, C.B., Bilec, M.M. (2012) Impact of lifetime on US residential building LCA results, *Int. J. Life Cycle Assess*, no. 17, pp. 337-349.

Bird, D.N. (2013) The benefits of using an Austrian specific model for emissions from paperproducts, *Working paper* http://www.smartforests.at/linked/d.05_hwp_-_paper_accounting.pdf.

Bowyer, J.L., Bratkovich, D.S., Fernholz, K. (2012) *Utilization of harvested wood by the North American forest products industry*, Dovetail Partners Outlook, 22 p.

- Braun, M., Winner, G., Schwarzbauer, P., Stern, T. (2016) Apparent half-life-dynamics of harvested wood products (HWPs) in Austria, Development and analysis of weighted time-series for 2002 to 2011, *Forest Policy and Economics*, no. 63, pp. 28-34.
- Brischke, C., Bayerbach, R., Otto Rapp, A. (2006) Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products, *Wood Mater. Sci. Eng.*, no. 1, pp. 91-107, doi: 10.1080/17480270601019658.
- Brunet-Navarro, P., Jochheim, H., Muys, B. (2016) Modelling carbon stocks and fluxes in the wood product sector: a comparative review, *Glob. Chang. Biol.*, vol. 22(7), pp. 2555-2569.
- Burschel, P., Kursten, E., Larson, B.C., Weber, M. (1993) Present role of German forests and forestry in the national carbon budget and option to increase, *Water, Air and Soil Pollution*, no. 70, pp. 325-340.
- Cabeza, L.F., Boquera, L., Chafer, M., Verez, D. (2021) Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis, *Energy Build.*, vol. 231, 66 p., doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110612.
- Cetiner, I., Shea, A.D. (2018) Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings, *Energy Build.*, no. 168, pp. 374-384, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.019.
- Chang, Y.S., Han, Y., Park, J.H., Son, W.L., Park, J.S., Park, M.J., Yeo, H. (2014) Study on methods for determining half-life of domestic wooden panel among harvested wood products, *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, no.42(3), pp. 309-317, doi: 10.5658/WOOD.2014.42.3.309.
- Donlan, J., Skog, K., Byrne, K. A. (2012). Carbon storage in harvested wood products for Ireland 1961-2009, *Biomass and Bioenergy*, 46, 731-738, <https://doi.org/http://10.1016/j.biombioe.2012.06.018>.
- Dymond, C. (2012) Forest carbon in North America: annual storage and emissions from British Columbia's harvest, *Carbon Balance and Management*, p. 1-20.
- Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2003) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry; Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa Prefecture, Japan..
- IPCC (2019) *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, in Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds.). Published IPCC, Switzerland.
- IPCC (2014, 2013) *Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol*, in T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T.G. Troxler (eds.), Published IPCC, Switzerland.
-

- Jasinevicius G., Marcus Lindner, Emil Cienciala, Markku Tykkylainen (2018) Carbon Accounting in Harvested Wood Products: Assessment Using Material Flow Analysis Resulting in Larger Pools Compared to the IPCC Default Method, *Journal of Industrial Ecology*, Yale University, vol. 22(1), pp. 121-131.
- Kapur, A., Keoleian, G., Kendall, A. Kesler, S.E. (2008) Dynamic modeling of in-use cement stocks in the United States, *J. Ind. Ecol.*, no. 12, pp. 539-556.
- Karjalainen, T., Kellomaki, S., Pussinen, A. (1994) Role of Wood-based Products in Absorbing Atmospheric Carbon, *Silva Fennica*, no. 28(2), pp. 67-80.
- Li, L., Wei, X., Zhao, J., Hayes, D., Daigneault, A., Weiskittel, A., et al. (2022) Technological advancement expands carbon storage in harvested wood products in Maine, USA, *Biomass Bioenergy*, doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106457.
- Matsumoto, R., Kayo, C., Kita, S. et al. (2022) Estimation of carbon stocks in wood products for private building companies, *Sci Rep.*, no. 12. pp. 1-10, doi: 10.1038/s41598-022-23112-0.
- Miatto, A., Schandl, H., Tanikawa, H. (2017) How important are realistic building lifespan assumptions for material stock and demolition waste accounts, *Resour. Conserv. Recycl.*, no.122, pp. 143-154.
- Nabuurs, G.J. (1996) *Significance of wood products in forest sector carbon balances. Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle*, NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Pingoud, K., Perälä, A. L., Soimakallio, S., Pussinen, A. (2003) *Greenhouse gas impacts of harvested wood products*. Evaluation and development of methods, VTT research notes 2189, Espoo, Finland.
- Pingoud, K., Wagner F. (2006) Methane emissions from landfills and carbon dynamics of harvested wood products: the first-order decay revisited, *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, no. 11, pp. 961-978.
- Profft, I., Mund, M., Weber, G.E., Weller, E., Schulze, E.D. (2009) Forest management and carbon sequestration in wood products, *Eur. J. Forest Res.*, doi: 10.1007/s10342-009-0283-5.
- Sandberg, N. H., Sartori, I., Brattebo, H. (2014) Using a dynamic segmented model to examine future renovation activities in the Norwegian dwelling stock, *Energy Build.*, no. 82, pp. 287–295.
- Sanquetta, C., Tomé, M., Dias, A., Maas, G., Sanquetta, F. and Corte, A. (2019) Carbon storage and CO₂ dynamics from wood products harvested in Brazil during 1900-2016, *Carbon Management*, no. 10(4), 417-429.
- Sato, A., Nojiri, Y. (2019) Assessing the contribution of harvested wood products under greenhouse gas estimation: accounting under the Paris Agreement and the potential for double-counting among the choice of approaches, *Carbon Balance and Management*, no. 14(1), pp. 1-19.
-

Shmulsky, R., Jones, P.D. (2019) Forest products and wood science. An introduction Hoboken NJ, *John Wiley Sons, Inc.*, doi: 10.1002/9781119426400.

Skog, K. (2008) Sequestration of carbon in harvested wood products for the United States, *Forest Products Journal*, no. 58(6), pp. 56-72.

Skog, K., Nicholson, G. (1998) Carbon cycling through wood products: the role of wood and paper products in carbon sequestration, *For. Prod. J.*, no. 48 (7-8), pp. 75-83.

Soimakallio, Sampo, Fehrenbach, Horst, Sironen, Susanna, Myllyviita, Tanja, Adballa, Nabil, Seppälä, Jyri (2022) Fossil carbon emission substitution and carbon storage effects of wood-based products, *Reports of the Finnish Environment Institute*, no. 22, 93 p.

Steel, E.A. (2021) *Carbon Storage and Climate Change Mitigation Potential of Harvested Wood Products*, Draft Background Paper prepared for the 61st Session of the FAO Advisory Committee on Sustainable Forest-based Industries. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Forest Products and Statistics Team. 37 p.

Vásquez, F., Løvik, A.N., Sandberg, N.H., Müller, D.B. (2016) Dynamic type-cohort-time approach for the analysis of energy reductions strategies in the building stock, *Energy Build*, no. 111, pp. 37-55.

Статья поступила в редакцию (Received): 29.01.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 19.05.2024.

Для цитирования / For citation

Полумиева, П.Д., Трунов, А.А. (2024) Анализ возможности уточнения «периодов полураспада» древесной продукции для оценки запасов углерода в заготовленных лесоматериалах, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 1-2, с. 124-139, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-124-139.

Polumieva, P.D., Trunov, A.A. (2024) Analysis of the possibility of refinement the “half-lives” of wood products to assess carbon stocks in the harvested wood products, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXV, no. 1-2, с. 124-139, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-124-139.

Возможности дистанционного зондирования Земли для оценки изменений в землепользовании

П.Д. Полумиева, А.А. Трунов, В.Н. Коротков*

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

*адрес для переписки: pollipolumieva@igce.ru

Реферат. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются одним из наиболее объективных инструментов для получения качественной и количественной информации о состоянии земель на территории Российской Федерации. Развитие спутниковых систем в настоящее время позволяет получать большие объемы данных ДЗЗ в оперативном режиме. В настоящей статье представлен краткий обзор публикаций, а также онлайн-сервисов и программного обеспечения, которые успешно применяют данные ДЗЗ для исследования тех или иных категорий земельных угодий и изменений в землепользовании. Оценка площадей земельных угодий является основой для расчета выбросов парниковых газов в рамках обязательств по статьям 4 и 12 Рамочной конвенции ООН об изменении климата, что находит отражение в Национальном кадастре парниковых газов Российской Федерации.

Ключевые слова. Парниковые газы, данные дистанционного зондирования Земли, землепользование, кадастр парниковых газов, дешифрирование.

The possibility of remote sensing data for the land use change

P.D. Polumieva, A.A. Trunov, V.N. Korotkov*

Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

*corresponding author: pollipolumieva@igce.ru

Abstract. Remote sensing data is one of the most accurate and objective tools for obtaining qualitative and quantitative information about the state of the land fund on the territory of the Russian Federation. Materials of aerial and space surveys currently allow obtaining large amounts of data on the study area in an online mode. This article provides an overview of available Russian and foreign scientific and methodological works, as well as online services and software, which are examples of the successful use of Earth remote sensing data for the purpose of studying certain categories of land and the dynamics of their changes over time. Analysis and forecasting of land-use change are of great importance in addressing global challenges such as food security, biodiversity loss, climate change adaptation and mitigation. In addition, land-use change affects the balance of greenhouse gas emissions and is subject to accounting under the obligations under

Articles 4 and 12 of the United Nations Framework Convention on Climate Change, thus being one of the categories that is reflected in the National Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Removals of the Russian Federation. The article shows how the use of Earth remote sensing data can improve the quality of reporting on greenhouse gas emissions.

Keywords. Greenhouse gases, Earth remote sensing data, land use, greenhouse gas inventory, interpretation.

Введение

В рамках обязательств Российской Федерации по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), Киотскому протоколу и Парижскому соглашению ежегодно ведется подготовка Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов (НДК) (Национальный..., 2023). Кадастр парниковых газов является одним из инструментов, позволяющих оценить выполнение международных обязательств по снижению антропогенных выбросов. Инвентаризация антропогенных выбросов парниковых газов ведется по секторам «Энергетика», «Промышленные процессы и использование продукции», «Сельское хозяйство», «Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство» (ЗИЗЛХ) и «Отходы». По сравнению с 1990 годом – базовым годом РКИК ООН и Киотского протокола, совокупные выбросы в 2021 г. значительно снизились (на 45.9% с учетом сектора ЗИЗЛХ, и на 31.9% – без его учета) (Национальный..., 2023). Важнейшим элементом отчетности по парниковым газам в секторе ЗИЗЛХ является выделение «управляемых земель» – территорий, где потоки парниковых газов находятся под влиянием человека, а также отслеживание изменений в землепользовании, отражающих преобразование земельных угодий из одной категории в другую (МГЭИК, 2006).

Глобальные выбросы CO_2 , связанные с изменениями в землепользовании, в среднем составили $1.3 \pm 0.7 \text{ ГтСгод}^{-1}$ ($4.7 \pm 2.6 \text{ ГтСгод}^{-1}$) за период 2013-2022 гг., что составляет 12% антропогенных выбросов (Friedlingstein et al., 2023). В 2013-2022 годах крупнейшими источниками выбросов в порядке убывания были Бразилия, Индонезия и Демократическая Республика Конго, причем на эти три страны приходилось более половины глобальных выбросов CO_2 в результате изменения в землепользовании. В то же время в России сектор ЗИЗЛХ компенсировал 22.4% антропогенных выбросов в 2021 г. (Национальный..., 2023).

Анализ и прогнозирование изменений, связанных с использованием земельных ресурсов, имеют большое значение для регионального развития и управления землепользованием в интересах низкоуглеродной климатической политики. Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 08.11.2018 № 2418-Р «О плане мероприятий по совершенствованию правового регулирования земельных отношений» разработка методик применения и внедрения данных дистанционного зондирования, в том числе для органи-

зации рационального природопользования и устойчивого развития землепользования, является одним из приоритетных направлений. Распоряжением Правительства от 29 октября 2021 г. № 3052-р была утверждена «Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года», которая задает целевые показатели выбросов парниковых газов как для секторов, являющихся источниками, так и для сектора ЗИЗЛХ, являющимся нетто-поглотителем парниковых газов. В связи с этим уточнение вклада сектора ЗИЗЛХ является актуальной задачей.

Согласно требованиям методических рекомендаций МГЭИК (МГЭИК, 2006) исходными данными для кадастра могут являться данные государственной статистики о площадях земельных угодий, также данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Оценки изменений в землепользовании в национальном кадастре выполняются на основе данных земельного кадастра (Государственный..., 2023; Государственные..., 2024), которые включают данные о площадях земельных угодий на начало года, но не дают представления о площадях их взаимных переходов. В настоящее время в национальном кадастре используется подход первого уровня, который не учитывает взаимные переходы из одной категории земель в другую, а учитывает разницу в площадях между двумя моментами времени.

Согласно рекомендациям МГЭИК (МГЭИК, 2006) методы ДЗЗ могут быть использованы для решения такой задачи на основе анализа выборочных репрезентативных полигонов по всей территории страны. Анализ изображений, полученных посредством разновременных аэро- и космических съёмок, позволяет с высокой точностью отследить изменения структуры землепользования.

Использование ДЗЗ имеет уже столетнюю историю, когда уже в начале XX века стали использовать самолеты для съемки. С тех пор аэрофотосъемка стала широко применяться в различных областях, таких как геодезия, картография, геология, лесное хозяйство, экология и т.д. Аэрофотосъемка используется для получения высококачественных изображений земной поверхности, которые используются для создания карт, планов, анализа изменений на поверхности Земли, оценки состояния растительности, определения границ земельных участков и многих других целей.

ДЗЗ (Remote Sensing) – это метод получения информации о поверхности Земли с помощью специальных приборов, установленных на спутниках, самолетах или других платформах, находящихся на значительной высоте. Данные, полученные с помощью ДЗЗ, используются для анализа и изучения состояния окружающей среды, изменений климата, геологических процессов, сельского хозяйства, лесного хозяйства и других областей. Значительные успехи в использовании ДЗЗ были достигнуты при инвентаризации лесов и лесоустройстве (История..., 1998), а также в изучении фитомассы лесов (Щепаченко и др., 2017).

Задачей представленного обзора является оценка возможности применения ДЗЗ для определения площадей земельных угодий и их преобразований в результате антропогенной деятельности.

Основная часть

Важнейшим элементом отчетности в секторе ЗИЗЛХ является полный географический охват территории страны, а также учет площади управляемых и неуправляемых земель по основным категориям землепользования (лесные земли, возделываемые земли, сенокосы и пастбища, водно-болотные угодья, поселения, прочие земли) при составлении матрицы изменений в землепользовании. В России такая информация собирается Росреестром. Статистическая информация по типам угодий так же, как и по категориям земель, собирается Росреестром и публикуется в ежегодных докладах (<https://rosreestr.gov.ru>). Если категории земель отражают ведомственную принадлежность и не соответствуют категориям землепользования МГЭИК, то информация о площадях земельных угодий используется для составления НДК (Национальный..., 2023). В отраслевой отчетности Росреестра выделяются следующие типы угодий:

- сельскохозяйственные угодья (с подразделением на пахотные и кормовые угодья, залежи, многолетние насаждения);
- лесные земли (входящие в лесной фонд);
- земли под древесно-кустарниковой растительностью, не входящей в лесной фонд;
- земли под дорогами;
- земли застройки;
- земли под водой;
- земли под болотами;
- нарушенные земли;
- прочие земли.

Указанные типы угодий полностью соответствуют категориям МГЭИК. Так лесные земли, входящие в лесной фонд и земли под древесно-кустарниковой растительностью, не входящей в лесной фонд, полностью соответствуют категории «4.A Лесные земли» МГЭИК, пахотные угодья и многолетние насаждения, входящие в состав сельскохозяйственных угодий – категории «4.B Возделываемые земли»; кормовые угодья и залежи – категории «4.C Сенокосы и пастбища», земли под водой и под болотами – категории «4.D Водно-болотные угодья», земли под дорогами и под застройкой – категории «4.E Поселения», нарушенные земли и прочие земли – категории «4.F Прочие земли».

В НДК (Национальный..., 2023) приводятся сведения о динамике площадей угодий и об общей площади земельного фонда Российской Федерации за весь временной ряд, начиная с 1990 г. На основе этих данных в соответствии с требованиями РКИК (Пересмотр руководящих принципов РКИК ООН..., 2014) и руководствами МГЭИК составляются ежегодные матрицы перевода земель из одной категории в другую в целом по территории России. При разработке матрицы земель необходимо обеспечить полный географический охват страны, включать управляемые и неуправляемые земли, отслеживать изменения в землепользовании с использованием земельного кадастра,

карт, данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Существует несколько подходов (уровней сложности) к составлению матрицы земель:

Подход первого уровня определяет общую площадь для каждой отдельной категории землепользования, однако не дает подробной информации о преобразованиях между землепользованиями.

Подход второго уровня вводит отслеживание преобразований между категориями землепользования.

Подход третьего уровня позволяет получить более точную информацию, чем при подходе второго уровня, посредством возможности отслеживания переустройств землепользования на подробной пространственно-территориальной основе. Страны могут использовать сочетание различных подходов для различных регионов и в различное время.

В целом данные по земельным угодьям, предоставляемые Росреестром, обеспечивают полный географический охват страны, однако они недостаточны для отслеживания взаимных переходов из одной категории земельных угодий в другую. Пример матрицы земель представлен в табл. 1.

Основное внимание в отчетности Росреестра уделяется отслеживанию изменений между категориями земель (земли лесного фонда, земли сельскохозяйственного назначения, земли населенных пунктов, земли промышленности и иного назначения, земли водного фонда, земли ООПТ, земли запаса), отражающими ведомственную принадлежность, а не на оценку реальных изменений площади земельных угодий и отслеживания изменений в землепользовании, что требуется для отчетности в рамках РКК ООН.

Согласно разделу 6.3 главы 6 НДК (Национальный..., 2023) матрица перевода угодий, составленная в соответствии с классификацией угодий, предусмотренной разделом 2 Руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006, сформирована на основании допущений, а не фактических изменений в землепользовании.

Недостатком данных, предоставляемых Росреестром, является также отсутствие подразделения земельных угодий на управляемые и неуправляемые, хотя для земель сельскохозяйственного назначения собираются сведения об используемых угодьях (пашня, многолетние насаждения, сенокосы, пастбища, залежи). Для остальных категорий земель такой информации нет. Для лесных земель информация об управляемых землях берется из отраслевой отчетности Рослесхоза.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время имеют широкое применение для решения множества задач, в том числе мониторинга природных и антропогенных объектов, обнаружения полезных ископаемых в труднодоступных участках, для ведения земельного кадастра, отслеживания опасных природных явлений и многих других изменений на поверхности Земли (Малинников и др., 2008; Титова, Медведев, 2021). Основную часть ДДЗ получают из космоса. Большой одномоментный охват снимаемого участка на поверхности Земли, высокое временное, пространственное и спектральное разрешения космических снимков позволяют получать большие объемы данных на исследуемую территорию в оперативном режиме.

Таблица 1. Перевод площадей земель по категориям МГЭИК в РФ за период с 01.01.1990 по 01.01.2015, тыс. га
Table 1. Change of land-use categories according to IPCC categories in the Russian Federation for the period from 01.01.1990 to 01.01.2015, thousand ha

Типы земельных угодий	Было на 01.01.1990	Изменение площадей								Итого изменение ⁵⁾	Стало на 01.01.2015
		Лесные земли		Пахотные земли (управ- ляемые)	Луговые угодья		Водно- болотные угодья	Земли поселений	Другие земли		
		управляе- мые	неуправ- ляемые		управляе- мые	неуправ- ляемые					
Лесные земли – управляемые ¹⁾	609607.0		54955.6	484.1					-482.1		664297.4
– неуправляемые	168986.1	-54955.6				2539.8			-177.2	117157.3	234127.3
Пахотные земли (управляемые)	132544.6	-484.1				-29958.5	-5471.6	-176.0	-3986.3	-1771.7	91529.5
Луговые угодья – управляемые (сено- косы и пастбища) ²⁾	81306.6			29958.5			-10675.6				101575.0
– неуправляемые ²⁾	7799.5		-2539.8	5471.6	10675.6					97.7	21504.7
Водно-болотные угодья ³⁾	179295.0			176.0						45553.1	225241.9
Земли поселений ⁴⁾	9097.2	482.1	177.2	3986.3						98.5	13967.3
Другие земли	521188.3		-117157.3	1771.7		-97.7	-45553.1	-98.5			360276.0
Итого земель в Российской Федерации	1709824.2	-54957.6	-64564.3	41848.3	-19282.9	-13705.2	-45729.1	-4744.1	161135.0	2694.9	1712519.1

Примечания: ¹⁾ Площади облесения включены в общую площадь управляемых лесных земель.
²⁾ Включая земли, переведенные из пахотных угодий.
³⁾ Включая управляемые и неуправляемые водно-болотные угодья.
⁴⁾ Включая земли под дорогами, инфраструктурой и т.д. и земли, переведенные в поселения.
⁵⁾ С учетом земель Республики Крым. Итоговые значения могут незначительно отличаться от сумм по строкам в результате округления

Выполнение работ по отслеживанию состояния земель и их изменений во времени, основанное на сочетании дистанционных методов с небольшим объемом полевых исследований, которые проводятся на ограниченном количестве ключевых участков, позволяет сильно сократить сроки выполнения работ, а также увеличить точность получаемых данных. На современном этапе развития технологий можно с уверенностью сказать, что использование оперативной глобальной космической информации позволяет успешно осуществлять мониторинг как быстро протекающих (пожары, наводнения и т. п.), так и проходящих достаточно медленно процессов (зарастание вырубок и гарей), охватывающих большие территории (Абушенко и др., 2000).

Во многом успех использования в целях детектирования изменений землепользования разновременных, разнотипных, с разной степенью детальности данных аэро- и космических съемок, а также всех доступных картографических материалов, зависит от привлечения современных геоинформационных технологий. Имеет смысл создавать геоинформационные системы локального уровня, которые могут объединить весь набор необходимых тематических данных (статистических, географических, климатических, геолого-геоморфологических и проч.), материалы аэро- и космических съемок разных лет, результаты полевых и стационарных наблюдений на тестовых полигонах и любые другие дополнительные данные, имеющиеся на исследуемой территории.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – это растровые изображения, представленные в цифровом формате, в связи с этим их обработка и интерпретация тесно связана с цифровой обработкой изображений (Шихов и др., 2020). Классификация – это тематическая обработка изображений, которая позволяет производить автоматизированное разбиение снимков на однородные по какому-либо критерию области (классы объектов). Получающееся при этом изображение называется тематической картой. Поскольку обычно выделяют содержательно интерпретируемые классы объектов, то классификацию можно рассматривать как процедуру автоматизированного дешифрирования ДЗЗ.

Из года в год происходит совершенствование технологий получения и автоматизированного тематического дешифрирования ДЗЗ, благодаря чему данные, получаемые по космическим съемкам высокого разрешения, стали одним из наиболее оперативных, надежных и транспарентных источников информации для мониторинга состояния и динамических изменений в землепользовании (Непоклонов и др., 2020). Применение дешифрирования разновременных космических снимков в целях картографирования структуры землепользования является одним из лидирующих направлений, так как оно обеспечивает точное и качественное детектирование изменений исследуемого объекта для дальнейшего создания массива данных.

В целом, главная задача автоматизированного дешифрирования сводится к классификации – последовательной сортировке всех пикселей цифрового снимка на несколько групп (Учебно-методическая документация..., 2015). Автоматизированное (машинное) дешифрирование выполняется

исполнителем с помощью программных комплексов по специальным алгоритмам и основывается на нескольких методах, которые позволяют сгруппировать объекты по некоторым дешифровочным признакам, и сводится, по сути, к различным механизмам классификации. Классификация снимков делится на следующие виды: классификация с обучением (метод спектрального угла, метод минимального расстояния, метод дистанции Махаланобиса и классификация без обучения (Метод к-средних), Метод ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm). Для этого используют алгоритмы классификации двух видов – с обучением и без обучения (кластеризации). При классификации с обучением пиксели зональных снимков группируются на основе сравнения их яркостей в каждой спектральной зоне с эталонными значениями. При кластеризации все пиксели разделяют на группы – кластеры, не прибегая к обучающим данным. Затем кластеры, полученные в результате автоматической группировки пикселей, дешифровщик относит к тем или иным объектам. Достоверность компьютерного дешифрирования формально характеризуется отношением числа правильно классифицированных пикселей к общему их числу. Приемлемыми по точности и надежности считаются результаты дешифрирования, при котором объекты правильно распознаны в среднем в 70-85% случаев. При этом увеличение набора дешифрируемых объектов приводит к росту ошибки их опознавания.

Нейросетевые алгоритмы также широко применяются для интеллектуального анализа изображений, полученных с помощью ДЗЗ (Акинин и др., 2015; Абрамов и др., 2018). Для дешифрирования космических снимков используется архитектура на основе U-net сегментации изображения (например, Lovitt et al., 2022).

За последние несколько десятилетий было проведено множество научно-исследовательских работ по оценке применимости ДЗЗ для выявления тех или иных типов землепользования разного пространственно-временного масштаба как отечественных, так и зарубежных. Одна из первых работ (Bansal et al., 1991) была посвящена исследованию потенциала данных ДЗЗ, полученных из баз данных Landsat Thematic Mapper, для мониторинга лесовосстановления в Канаде. В работе S.D. Prince (1991) обсуждается апробация модели первичной продукции сельскохозяйственных культур, которая первоначально была разработана для соотнесения количества поглощенной фотосинтетически активной радиации с чистой продуктивностью, которая в качестве входных данных использует данные регионального дистанционного зондирования сельскохозяйственных земель с низким разрешением.

В исследовании R.S. DeFries с соавторами (DeFries et al., 2002) успешно проведена оценка изменений площади тропических лесов с 1980-х по 1990-е годы на основе данных набора данных Pathfinder AVHRR Landsat с целью уточнения объёма поглощенного углерода тропическими лесами и оценки их вклада в глобальный баланс углерода.

В работе G. Sun с соавторами (Sun et al., 2011) был представлен метод прогнозирования высоты растительности для оценки биомассы лесов. Дан-

ный метод лежит в основе статистической модели, применимой для целей регионального картирования, которая основана исключительно на данных дистанционного зондирования (Lidar, Radar).

В работе C.S.R. Neigh с соавторами (Neigh et al., 2014) показана разработка алгоритма, основанного на временных рядах данных Landsat, для картирования нарушений лесов в результате вырубок и нашествий насекомых в штатах Висконсин и Миннесота. Использование данных ДЗЗ в алгоритме показало высокую точность детектирования изменений площади лесов.

В работе J. Chen с соавторами (Chen et al., 2015) был разработан подход, основанный на интеграции пиксельных и объектных методов (POK-based) на основе обучаемой классификации. Эффективность подхода на основе POK-based была протестирована с использованием восьми выбранных областей с разными ландшафтами на пяти разных континентах. Была достигнута общая точность классификации более 80%. Это указывает на то, что разработанный подход на основе POK эффективен и осуществим для оперативного картирования с разрешением 30 м.

Ещё один пример успешного применения ДЗЗ – работа M.A. Wulder с соавторами (Wulder et al., 2020), в которой была получена точная пространственная оценка площади лесов Канады в 2010 году с использованием данных ДЗЗ, полученных по снимкам Landsat за более чем тридцатилетний период, на основе фотоинтерпретированных признаков почвенно-растительного покрова вместе с информацией о землепользовании.

В работе V. Nasiri с соавторами (Nasiri et al., 2022) приводили сравнение данных платформы облачных вычислений Google Earth Engine (GEE) для создания безоблачных временных рядов Sentinel-2 (S-2) и Landsat-8 (L-8) над провинцией Тегеран (Иран) по состоянию на 2020 год и оценка их эффективности в крупномасштабном картографировании землепользования и лесного хозяйства.

В работе K. Zhao с соавторами (Zhao et al., 2009) приводится разработка методов масштабно-инвариантной оценки биомассы лесных земель с использованием данных Lidar. Были предложены две масштабно-инвариантные модели для биомассы: линейная функциональная модель и эквивалентная нелинейная модель, которые используют полученные с помощью Lidar распределения высоты растительного покрова и квантильные функции высоты растительного покрова в качестве предикторов, соответственно. Результаты показывают, что модели могут точно прогнозировать биомассу и давать стабильные прогностические характеристики в различных регионах мира. Они также перспективны для оценки других характеристик леса, таких как подземная биомасса, объем древесины, вес топлива в кроне и индекс площади листьев.

Монография В.И. Акковецкого (1983) – одна из первых обзорных работ, посвященная дешифрированию космических снимков и обзору накопленного опыта применения данных ДЗЗ в научно-исследовательских работах, в том числе детектированию различных категорий землепользования по данным аэрофотосъемки.

Публикация Д.Е. Плотникова (Плотников и др., 2010) посвящена признакам распознавания вовлеченной в сельскохозяйственный оборот пашни на основе многолетних временных рядов измерений спектральной яркости земной поверхности радиометром MODIS со спутника Terra. Признаки распознавания учитывают характерные для пахотных земель особенности сезонной и межгодовой динамики вегетационного индекса PVI, который оценивается в двумерном пространстве значений яркости в красном и ближнем ИК спектральных диапазонах и тесно коррелирует с объемом зеленой фитомассы. В работе выполнена оценка информативности предложенных признаков распознавания при решении задачи выявления используемых пахотных земель. Полученные результаты необходимы для развития системы дистанционного мониторинга земель агропромышленного комплекса и позволяют усовершенствовать методы и технологии оценки динамики пахотных земель, прогнозирования урожая и решения ряда других сопряженных задач.

В работе С.А. Барталева с соавторами (Барталев и др., 2011) описан метод распознавания пахотных земель на основе многолетних временных рядов данных ДЗЗ, получаемых спектрорадиометром MODIS со спутников Terra и Aqua. Метод предполагает вычисление по спутниковым данным набора признаков распознавания, учитывающих особенности сезонной и межгодовой динамики спектрально-отражательных характеристик используемых пахотных земель, отличающих их от других категорий сельскохозяйственных угодий и естественной растительности. Выявление пахотных земель выполняется с использованием алгоритма локально-адаптивной обучаемой классификации, учитывающей пространственную вариабельность значений признаков распознавания. Использование метода позволило создать карту пахотных земель для всей территории России.

В работе (Барталев, Лупян, 2013) приводится обзор успешно выполненных разработок Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) в области спутникового мониторинга растительного покрова, в том числе картографические материалы динамики и повреждений растительного покрова по данным MODIS и Landsat-TM/ETM+.

В работе (Жарко, Барталев, 2014) приводит результаты экспериментальной оценки распознавания преобладающих пород лесов двух тестовых регионов, выбранных таким образом, чтобы обеспечить разнообразие хвойных и лиственных насаждений. При этом в основу методики распознавания преобладающих пород лесов были положены особенности фенологической динамики их спектрально-отражательных характеристик, измеряемых спутниковым спектрорадиометром MODIS. Выполнена сравнительная оценка распознавания древесных пород на основе недельных и сезонных композитных изображений коэффициентов спектральной яркости земной поверхности.

В монографии (Барталев и др., 2016) рассмотрены физические основы дистанционного зондирования растительного покрова в оптическом диапазоне, приводится описание особенностей разрабатываемых автоматизированных методов спутникового картографирования растительного покрова и

анализируются возможности интеграции созданных спутниковых карт в глобальную модель динамики растительного покрова и ее региональной адаптации к условиям России.

Разработаны учебно-методические пособия (Шихов и др., 2020), где приводятся примеры успешного определения границ, типов и текущего состояния всех категорий землепользования, а также естественных и антропогенных нарушений лесов с указанием характерных признаков и выводов по интерпретации изображений, полученных по многозональным спутниковым снимкам среднего и высокого пространственного разрешения.

Активная разработка методов и технологий, связанных с ДДЗ, позволила в начале 2000-х годов создать ряд тематических продуктов и специализированных систем мониторинга наземных экосистем. Одним из такого рода продуктов, в частности, следует отнести полученную по данным SPOT-Vegetation карту наземных экосистем Северной Евразии (Bartalev et al., 2003), нашедшую широкое использование в научно-исследовательских проектах и интегрированную в большое число действующих систем мониторинга окружающей среды. В тот же временной период была введена в эксплуатацию не имеющая до настоящего времени аналогов по уровню функциональности Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Рослесхоза (ИСДМ-Рослесхоз) (Абушенко и др., 2000; Ершов и др., 2004; Лупян и др., 2007). Получили развитие автоматические методы картографирования повреждений растительного покрова пожарами на основе данных SPOT-Vegetation, позволившие сформировать многолетнюю базу данных о поврежденных огнем участках на территории России (Егоров и др., 2006) и бореального пояса Земли (Bartalev et al., 2007).

С начала XXI века началась активно идти разработка методов спутникового мониторинга сельскохозяйственных угодий. Например, на основе многолетних рядов данных MODIS был разработан метод распознавания используемых пахотных земель и создана соответствующая цифровая карта на территорию России (Барталев и др., 2006), которая нашла своё применение при проведении Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2006 г. Кроме того, была создана и введена в опытную эксплуатацию в интересах Министерства сельского хозяйства РФ Система дистанционного мониторинга земель агропромышленного комплекса (СДМЗ АПК) (Лупян и др., 2009).

Выполненные разработки широко используются в ряде прикладных систем спутникового мониторинга окружающей среды, в частности, таких как Информационный спутниковый сервис мониторинга растительного покрова ВЕГА, разработанный в интересах широкого круга пользователей (Лупян и др., 2011, 2015).

На практике существуют примеры использования данных ДЗЗ для региональных оценок изменений в землепользовании. В учебно-методической документации по мониторингу землепользования с помощью Единой картографической системы Ямало-Ненецкого АО (Учебно-методическая документация..., 2015) дано описание основных инструментов при работе с Единой

картографической системой Ямало-Ненецкого АО и приводятся примеры мониторинга землепользования и отслеживания его изменений.

Помимо научных и методических работ за последнее время были разработаны онлайн сервисы и программное обеспечение, которые работают с данными ДЗЗ и используются, в том числе, для детектирования категорий землепользования, оценки их площадей и различных природных и антропогенных нарушений.

ВЕГА-Science (УНУ «BS ИКИ-Мониторинг») – уникальная отечественная научная установка, которая входит в состав Центра коллективного пользования ЦКП "ИКИ-Мониторинг" ИКИ РАН, предназначенного для решения научных задач изучения и мониторинга окружающей среды с использованием методов и технологий спутникового дистанционного зондирования (<http://sci-vega.ru/>). "ВЕГА-Science" предоставляет распределенный доступ к многолетним ежедневно пополняющимся архивам спутниковых данных и получаемые на их основе различным информационным продуктам, в первую очередь ориентированным на характеризующие изучение и анализ состояния растительного покрова. "ВЕГА-Science" также предоставляет пользователям возможности по проведению удаленной обработки и анализа спутниковых данных и результатов их обработки с использованием вычислительных ресурсов ЦКП "ИКИ-Мониторинг".

В основу сервиса положены многолетние архивы спутниковых данных и получаемые на их основе информационные продукты, характеризующие состояние растительного покрова Северной Евразии, включая Россию и близлежащие страны. По любому району этой территории в архивах имеются данные с начала двадцать первого столетия. Сервис ВЕГА-Science, в частности, позволяет анализировать с использованием временных рядов вегетационных индексов состояние растительного покрова, его сезонную и многолетнюю динамику для любой отдельной точки или заданного пользователем полигона.

FAO Open Foris CE (<https://openforis.org/>) – это бесплатный инструмент с открытым исходным кодом, который опирается на другое вспомогательное программное обеспечение (Google Earth Engine) и репозитории изображений дистанционного зондирования (Google Earth, Bing Maps, Landsat и MODIS и др.). FAO Open Foris CE позволяет собирать высококачественную визуальную информацию для разработки кадастров парниковых газов в секторе ЗИЗЛХ. Так, в статье I.A. Tzamtzis (Tzamtzis et al., 2019) представлено подробное описание принципов работы данного инструмента, а также предложен последовательный методический подход для обеспечения пользователей процедурой классификации, которая способствует прозрачности, полноте, последовательности и точности процесса классификации земель и, следовательно, сопоставимости результатов, полученных разными пользователями в разное время.

Global Forest Watch представляет из себя сервис, предназначенный для изучения потерь и восстановления лесных ресурсов Земли. На сайте проекта (<https://www.globalforestwatch.org>) пользователи могут изучить карту гибели

и восстановления лесных ресурсов планеты, узнать о вкладе лесной промышленности в экономику различных стран, а также сервис позволяет производить оценки запаса углерода лесных территорий за различные периоды времени начиная с 2000 года. Инструменты анализа лесного покрова находятся в свободном доступе и имеют удобный пользовательский интерфейс. Минусы сервиса заключаются в том, что он не позволяет выделить отдельно земли, подвергшиеся обезлесению (переводу лесных земель в нелесные угодья) и временно непокрытые лесной растительностью участки, возникшие в результате рубок, пожаров и других негативных факторов. Это затрудняет использование этого сервиса для разработки национальных и региональных кадастров парниковых газов, для которых важно отдельно отслеживать изменения в землепользовании и нарушения лесного покрова.

Copernicus Global Land Service (<https://land.copernicus.eu>) – европейская программа по наблюдению и мониторингу Земли в глобальном масштабе. Copernicus Global Land Service периодически выпускает серии различных квалифицированных биогеофизических продуктов о состоянии и эволюции земной поверхности в глобальном масштабе и со средним и низким пространственным разрешением, которые дополняются возможностью составления долгосрочных временных рядов. Сервис используется для мониторинга сельскохозяйственных и лесных ресурсов, водных ресурсов, температуры поверхности земли, коэффициента отражения поверхности и альбедо. Copernicus Global Land Service (CGLS) является компонентом Базовой службы мониторинга земель (LMCS), имеет свободный доступ и широко используется научными и коммерческими организациями во многих странах. Использование сервиса позволяет оценивать изменения между категориями землепользования, категории земель, но не совсем корректно оцениваются площади, сервис не выдает табличную информацию, которую можно было бы использовать при разработке кадастров парниковых газов.

Earth Map (<https://earthmap.org>) – это инструмент со свободным доступом для анализа окружающей среды и климата (в том числе ретроспективного), основанный на Google Earth и разработанный в рамках инициативы ФАО Open Foris при поддержке Правительства Германии в рамках Международной климатической инициативы (IKI) Федерального министерства окружающей среды, охраны природы и ядерной безопасности. Данные Earth Map разделены на тематические группы и позволяют пользователю визуализировать слои (карты) и генерировать статистику для описания областей, представляющих для него интерес. Некоторые из этих слоев позволяют пользователям получать доступ к нескольким периодам времени. Сервис обладает удобным пользовательским интерфейсом и позволяет получать информацию в областях сельского хозяйства, лесного хозяйства, водных ресурсов, почв, деградации почв, климата, пожаров, выбросов парниковых газов, использования земель и многих других. Таким образом, данный сервис предоставляет пользователям как временную (доступ к данным временных рядов), так и пространственную (визуализация карт) перспективу для интересующих их областей.

Earth Map позволяет анализировать площади категорий землепользования и изменений между категориями землепользования, есть возможность производить оценки в целом по стране, отдельному региону и району. Интересующая пользователя информация может быть выведена в визуальном так и в табличном виде. Earth Map предоставляет возможность обработки данным по различным классификаторам, включая классификацию категорий землепользования согласно МГЭИК (МГЭИК, 2006), что делает его потенциально возможным в использовании при разработке национальных и региональных кадастров парниковых газов. Сервис автоматически строит матрицы перевода земель и выдает табличные данные по площадям изменений для каждой категории землепользования с 2015 года. Однако, при первом рассмотрении выявлено, что в результате анализа несколько завышены площади перевода в водно-болотные угодья, что может быть связано с тем, что снимки сделаны в паводковый период. Также, не учитываются управляемые и неуправляемые категории землепользования, что представляется критичным при оценке антропогенных выбросов и поглощения парниковых газов.

Команда Global Land Analysis and Discovery (GLAD) (<https://glad.umd.edu/>) Университета Мэриленда разработала и внедрила автоматизированную систему обработки данных Landsat, которая генерирует глобальные согласованные данные, подготовленные к анализу (GLAD ARD), в качестве исходных данных для картографирования земного покрова и землепользования, и анализа их изменений. Алгоритмы обработки данных были разработаны (Hansen et al., 2008; Potapov et al., 2012, 2020) и протестированы в глобальном масштабе для картирования различных природных объектов (леса, водные объекты и поверхности без растительности) (Potapov et al., 2020). Данные GLAD ARD были использованы в качестве исходных данных для картирования региональной структуры растительности и определения типа сельскохозяйственных культур (Potapov et al., 2020). GLAD ARD представляет 16-дневные временные ряды согласованных мозаичных данных Landsat, нормализованных коэффициентов отражения поверхности с 1997 г. по настоящее время, ежегодно обновляемых и подходящих для оперативных приложений по изменению земного покрова. Данные предоставляются бесплатно и доступны через специальный интерфейс прикладного программирования (API) (<https://glad.umd.edu/ard/home>). В дополнение к набору данных ARD команда GLAD разработала и предоставила пользователям набор инструментов для обработки данных временных рядов, анализа и характеристики машинного обучения. Вместе глобальный набор данных GLAD ARD и инструменты анализа и характеристики ARD обеспечивают сквозное решение для национальных и региональных пользователей для бесплатной оценки и мониторинга природных ресурсов на основе Landsat.

АО «Терра Тех» – коммерческий оператор услуг дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных сервисов на их основе. Создан Госкорпорацией «Роскосмос» в 2017 году как дочернее предприятие АО «Российские космические системы». Разработал более 90 собственных тематических нейросетей на основе данных ДЗЗ для применения их в

продуктах автоматической обработки космических данных для распознавания типов землепользования и их фактических изменений. Один из таких продуктов – Pixel.Ai (www.pixel-ai.terratech.ru) – является полностью автоматическим сервисом, который использует новые подходы к формированию аналитики на основе искусственного интеллекта и космических снимков для конечных пользователей.

В рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ», утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2022 г. № 3240-р Институтом космических исследований РАН (в составе возглавляемого Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН консорциума российских научных и научно-производственных организаций) создана и разрабатывается информационно-аналитическая система (ИАС) «Углерод Экосистем» (ИАС «Углерод-Э» - <http://carbon.geosmis.ru/>). ИАС «Углерод-Э» предоставляет инструменты комплексного анализа многолетних временных рядов данных о характеристиках лесных и других наземных экосистем, в том числе, запасах и динамике углерода на различных пространственных уровнях. Кроме того, ИАС «Углерод-Э» обеспечивает: получение ежегодно актуализируемой информации о качественных и количественных характеристиках лесов (площадь, запас древесины, преобладающая порода, полнота, бонитет, возраст и другие характеристики); получение ежегодной информации о запасах и балансе углерода в лесах; получение информации о повреждениях лесных и других наземных экосистем пожарами и другими факторами.

Информационно-аналитическая система «Углерод-Э» является одним из ключевых элементов создаваемой системы национального мониторинга углерода в наземных экосистемах Российской Федерации. Она служит в качестве единой технологической платформы сбора, хранения и анализа данных непрерывного комплексного мониторинга пулов и потоков углерода в наземных экосистемах страны.

Выводы

Современный этап развития методов и технологий обработки и анализа данных ДЗЗ (в том числе космической съемки) характеризуется выраженным трендом на автоматизацию, как видно из представленных в анализе материалов. За последние годы было разработано множество новых методов автоматизированного анализа изображений. Наиболее перспективными из них являются алгоритмы, основанные на искусственном интеллекте (моделях машинного обучения). Появление таких алгоритмов в совокупности с ростом пространственного и временного разрешения данных ДЗЗ позволяет решать на их основе принципиально новые задачи как научного, так и практического характера.

Использование данных ДДЗ Земли помимо явных преимуществ, имеет также ряд ограничений. Так, до недавнего времени основной проблемой применения данных ДДЗ считалось их пространственное и временное разрешение. Например, в проведенных ранее исследованиях (Барталев, Лупян, 2013) было наглядно показано, что автоматизированное распознавание категорий лесных и нелесных земель, лесов различной породного состава, разных категорий сельско-хозяйственных земель должно опираться на использование данных дистанционных наблюдений достаточно высокого пространственного разрешения, что накладывает дополнительные ограничения на возможности выбора спутниковых систем ДЗЗ для решения этой задачи. На сегодняшний день такие данные можно получить из систем ProbaV, Landsat-OLI и Sentinel-2.

В настоящее время в мире проводится множество успешных работ по оценке изменений землепользования по данным ДЗЗ, все они в той или иной степени могут частично покрывать потребности по получению данных для разработки матрицы земель Национального кадастра парниковых газов. Однако, не существует единого программного средства, которое бы учитывало особенности физико-географических характеристик Российской Федерации.

Анализ отечественной и зарубежной литературы для сбора необходимой исходной информации по сектору ЗИЗЛХ показал, что современные алгоритмы и технологии по обработке и анализу данных ДЗЗ позволяют провести разработку полноценного программного обеспечения с учетом национальных особенностей, с помощью которого возможно произвести сбор необходимой отсутствующей исходной информации.

Список литературы

Абрамов, Н.С., Макаев, Д.А., Талалаев, А.А., Фраленко, В.П. (2018) Современные методы интеллектуальной обработки данных ДЗЗ, *Программные системы, теория и приложения*, т. 9, № 4, с. 417-442.

Абушенко, Н.А., Барталев, С.А., Беляев, А.И., Ершов, В.В., Коровин, Г.Н., Кошелев, В.В., Лупян, Е.А., Крашенинникова, Ю.С., Мазуров, А.А., Минько, Н.П., Назиров, Р.Р., Прошин, А.А., Флитман, Е.В. (2000) Система сбора, обработки и доставки спутниковых данных для решения оперативных задач службы пожароохраны лесов России, *Наукоемкие технологии*, т. 1, № 2, с. 4-18.

Акинин, М.В., Никифоров, М.Б., Таганов, А.И. (2015) *Нейросетевые системы искусственного интеллекта в задачах обработки изображений*, М., Научно-техническое издательство "Горячая линия-Телеком", 154 с.

Акковецкий, В.И. (1983) *Дешифрирование снимков*, Москва, Недра, 374 с.

Барталев, С.А. Егоров, В.А., Жарко, В.О. и др. (2016) *Спутниковое картографирование растительного покрова России*, Москва, ИКИ РАН, 208 с.

Барталев, С.А., Лупян, Е.А. (2013) Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, т. 10, № 4, с. 197-214.

Барталев, С.А., Егоров, В.А., Лупян, Е.А. и др. (2011) Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации, *Компьютерная оптика*, т. 35, № 1, с. 103-116.

Барталев, С.А., Лупян, Е.А., Нейлиада, И.А., Савин, И.Ю. (2006) Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS, *Исследование Земли из космоса*, № 3, с. 68-75.

BEGA-Science, электронный ресурс, URL: <http://sci-vega.ru/> (дата обращения 15.01.2024).

Государственные национальные доклады о состоянии и использовании земель Российской Федерации, электронный ресурс, URL: <https://rosreestr.gov.ru/activity/gosudarstvennoe-upravlenie-v-sfere-ispolzovaniya-i-okhrany-zemel/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii/> (дата обращения 10.01.2024).

Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации, М., Росреестр, 2023, 185 с.

Егоров, В.А., Барталев, С.А., Лупян, Е.А., Уваров, И.А. (2006). Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений, *Известия вузов, геодезия и аэрофотосъемка*, вып. 2, с. 98-109.

Ершов, Д.В., Коровин, Г.Н., Лупян, Е.А., Мазуров, А.А., Тащилин, С.А. (2004) Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, № 1, с. 47-57

Жарко, В.О., Барталев, С.А. (2014) Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, т. 11, № 3, с. 159-170.

История лесоустройства Российского. К 200-летию учреждений лесного департамента, Составитель – Гусев Н.Н., М., Центрлеспроект, 1998, 330 с.

Лупян, Е.А., Балашов, И.В., Бурцев, М.А., Ефремов, В.Ю., Кашницкий, А.В., Кобец, Д.А., Крашенинникова, Ю.С., Мазуров, А.А., Назиров, Р.Р., Прошин, А.А., Сычуглов, И.Г., Толпин, В.А., Уваров, И.А., Флитман, Е.В. (2015) Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, т. 12, № 5, с. 53-75.

Лупян, Е.А., Барталев, С.А., Савин, П.Е. (2009) Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России, *Аэрокосмический курьер*, № 6, с. 47-49.

Лупян, Е.А., Мазуров, А.А., Ершов, Д.В., Коровин, Г.Н., Королева, Н.В., Абушенко, Н.А., Тащилин, С.А., Сухинин, А.И., Афонин, С.В., Белов, В.В., Гришин, А.М., Соловьев, В.С. (2007) Спутниковый мониторинг лесов России, *Оптика атмосферы и океана*, т. 20, № 5, с. 443-447.

Лупян, Е.А., Савин, И.Ю., Барталев, С.А., Толпин, В.А., Балашов, П.В., Плотников, Д.Е. (2011) Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега»), *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, т. 8, № 1, с. 190-198.

Малинников, В.А., Стеценко, А.Ф., Алтынов, А.Е., Попов, С.М. (2008) *Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами*. Учебное пособие для студентов вузов, М., Изд. МИИГАиК, 145 с.

МГЭИК (2006) *Руководящие принципы МГЭИК 2006 года для национальных кадастров парниковых газов. Том 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования*, МГЭИК, ИГЕС, Япония.

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

Непоклонов, В.Б., Хабаров, Д.А., Хабарова, И.А. (2020) Применение геоинформационных технологий при исследовании изменений структуры землепользования территорий по материалам многозональной космической съемки, *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий*, № 2.

Пересмотр руководящих принципов РКИК ООН для представления информации о годовых кадастрах Сторон, включенных в приложение I к Конвенции (2014) Документ FCCC/CP/2013/10/Add.3, <https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a03.pdf>.

Плотников, Д.Е., Плотников, Д.Е., Барталев, С.А., Лупян, Е.А. При- знаки распознавания пахотных земель на основе многолетних рядов данных спутникового спектрорадиометра MODIS, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, т. 7, № 1, с. 330-341.

Распоряжение Правительства Российской Федерации от 08.11.2018 № 2418-Р «О плане мероприятий по совершенствованию правового регулирования земельных отношений».

Титова, А.Г., Медведев, А.А. (2021) Зонирование контролируемых и неконтролируемых объектов захоронения коммунальных отходов на основе данных дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения, *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, т. 65, № 6, с. 634-646.

Учебно-методическая документация: Мониторинг землепользования (2015) Тюменский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформационных систем, Документация ЕКС ЯНАО (yanao.ru) (дата обращения: 30.10.2023).

Щепашенко, Д.Г., Швиденко, А.З., Пергер, К. (2017) Изучение фито-массы лесов: текущее состояние и перспективы, *Сибирский лесной журнал*, 2017, № 4, с. 3-11.

Шихов, А.Н., Герасимов, А.П., Пономарчук, А.И., Перминова, Е.С. (2020) *Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учебное пособие*, Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 191 с.

Bansal, A., Murtha, A.P., Wiart, R. (1991) An evaluation of Landsat thematic mapper data for reforestation monitoring in British Columbia, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 19, no. 3, pp. 163-174.

Bartalev, S.A., Belward, A.S., Ershov, D.V., Isaev, A.S. (2003) A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no. 9, pp. 1977-1982.

Bartalev, S.A., Egorov, V.A., Loupian, E.A., Uvarov, I.A. (2007) Multi-Year Circumpolar Assessment the Area Burnt in Boreal Ecosystems Using SPOT-Vegetation, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no. 6, pp. 1397-1404.

Chen, Jun, Chen, Jin, Liao, A., et al. (2015) Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 103, pp. 7-27.

Copernicus Global Land Service, available at: <https://land.copernicus.eu> (дата обращения 11.01.2024).

DeFries, R.S., Houghton, R.A., Hansen, M.C., et al. (2002) Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99, p. 14256-14261.

Earth Map, available at: <https://earthmap.org> (дата обращения 10.01.2024).

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R., Bakker, D.C.E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I.T., Peters, G.P. et al. (2023) Global Carbon Budget 2023, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, pp. 5301-5369, <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>.

GLAD Landsat ARD Tools, available at: <https://glad.umd.edu/ard/home> (дата обращения 10.01.2024).

Global Forest Watch, available at: <https://www.globalforestwatch.org> (дата обращения 11.01.2024).

Hansen, M.C., Roy, D.P., Lindquist, E., Adusei, B., Justice, C.O., Altstatt, A. (2008) A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic

monitoring of forest cover and change in the Congo Basin, *Remote. Sens. Environ.*, no. 112, pp. 2495-2513.

Lovitt, J., Richardson, G., Rajaratnam, K., Chen, W., Leblanc, S.G., He, L., Nielsen, S.E., Hillman, A., Schmelzer, I., Arsenault, A. (2022) A New U-Net Based Convolutional Neural Network for Estimating Caribou Lichen Ground Cover from Field-Level RGB Images, *Can. J. Remote Sens.* vol. 48, no. 6, pp. 849-872.

Nasiri, V., Deljouei, A., Moradi, F. et al. (2022) Land Use and Land Cover Mapping Using Sentinel-2, Landsat-8 Satellite Images, and Google Earth Engine: A Comparison of Two Composition Methods, *Remote Sensing*, vol. 14, pp. 1977.

Neigh, C.S.R., Bolton, D.K., Diabate, M., Williams, J.J. (2014) Automated approach to map the history of forest disturbance from insect mortality and harvest with Landsat time-series data, *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 2782-2808.

Open Foris, available at: <https://openforis.org/> (дата обращения 10.01.2023).

Pixel. Ai, available at: <https://www.pixel-ai.terratech.ru> (дата обращения 08.01.2023).

Potapov, P.V., Turubanova, S.A., Hansen, M.C., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., Mane, L., Justice, C.O. (2012) Quantifying Forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data, *Remote Sens. Environ.*, vol. 122, pp. 106-116.

Potapov, P., Hansen, M.C., Kommareddy, I., Kommareddy, A., Turubanova, S., Pickens, A., Adusei, B., Tyukavina, A., Ying, Q. (2020) Landsat Analysis Ready Data for Global Land Cover and Land Cover Change Mapping, *Remote Sens.*, no. 12, pp. 426, <https://doi.org/10.3390/rs12030426>.

Prince, S.D. (1991) A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, pp. 1313-1330.

Sun G., Ranson K. J., Guo Z., et al. (2011) Forest biomass mapping from Lidar and radar synergies, *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, pp. 2906-2916.

Tzamtzis, I., Federici A S., Hanle L. (2019) Methodological Approach for a Consistent and Accurate Land Representation Using the FAO Open Foris Collect Earth Tool for GHG Inventories, *Carbon Management*, vol. 10, issue 3, pp. 437-450.

Wulder, M.A., Hermosilla, T., Stinson, G., et al. (2020) Satellite-based time series land cover and change information to map forest area consistent with national and international reporting requirements, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, vol. 93, issue 3, pp. 331-343.

Zhao, K., Popescu, S., Nelson, R. (2009) Lidar remote sensing of forest biomass: a scale-invariant estimation approach using airborne lasers, *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp. 182-196.

References

- Abramov, N.S., Makayev, D.A., Talalayev, A.A., Fralenko, V.P. (2018) *Sovremennyye metody intellektual'noy obrabotki dannykh DZZ* [Modern methods for intelligent processing of Earth remote sensing data], *Programmnyye system, teoriya i prilozheniya*, vol. 9, no. 4, pp. 417-442.
- Abushenko, N.A., Bartalev, S.A., Belyaev, A.I., Ershov, V.V., Korovin, G.N., Koshelev, V.V., Lupyan, E.A., Krashenninnikova, Yu. S., Mazurov, A.A., Min'ko, N.P., Nazirov, R.R., Proshin, A.A., Flitman, E.V. (2000) *Sistema, sbora, obrabotki i dostavki sputnikovyyh dannyh dlya resheniya operativnyh zadach sluzhby pozharoohrany lesov Rossii* [A system for collecting, processing and delivering satellite data for solving operational tasks of the fire protection service of Russian forests], *Naukoemkie tekhnologii*, vol. 1, no. 2, pp. 4-18.
- Akkoveckij, V.I. (1983) *Deshifrirovaniye snimkov* [Satellite image interpretation], Nedra, Moscow, Russia, 374 p.
- Akinin, M.V., Nikiforov, M.B., Taganov, A.I. (2015) *Neyrosetevyye sistemy iskusstvennogo intellekta v zadachakh obrabotki izobrazheniy* [Neural network systems of artificial intelligence in image processing problems], Nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo "Goryachaya liniya-Telekom, Moscow, Russia, 154 p.
- Bartalev, S.A., Lupyan, E.A. (2013) *Issledovaniya i razrabotki IKI RAN po razvitiyu metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova* [Research and development of IKI RAS on the development of methods for satellite monitoring of vegetation cover], *Sovremennyye problem ydistancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 10, no. 1, pp. 197-214.
- Bartalev, S.A., Lupyan, E.A., Nejlitadt, I.A., Savin, I.Yu. (2006) *Klassifikatsiya nekotorykh tipov sel'skohozyajstvennykh posevov v yuzhnykh regionakh Rossii po sputnikovym dannym MODIS* [Classification of some types of agricultural crops in the southern regions of Russia according to MODIS satellite data], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, no. 3, pp. 68-75.
- Bartalev, S.A., Egorov, V.A., Lupyan, E.A. (2011) *Raspoznavaniye pahotnykh zemel' na osnove mnogoletnykh sputnikovyyh dannyh spektroradiometra MODIS i lokal'no-adaptivnoy klassifikatsii* [Identification of arable land based on long-term satellite data of the MODIS spectroradiometer and locally adaptive classification], *Komp'yuternaya optika*, vol. 35, no. 1, pp. 103-116.
- Bartalev, S.A., Egorov, V.O., Zharko (2016) *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* [Satellite mapping of the vegetation cover of Russia], IKI RAN, Moscow, Russia, 208 p., ISBN 978-5-00015-006-1.
- VEGA-Science, official web-site, available at: <http://sci-vega.ru/> (accessed 12.01.2023).
- Gosudarstvennyye nacional'nye doklady o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' Rossijskoj Federatsii (2023) [State national reports on the state and use of lands of
-

the Russian Federation], Available at: <https://rosreestr.gov.ru/activity/gosudarstvennoe-upravlenie-v-sfere-ispolzovaniya-i-okhrany-zemel/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii/> (accessed 10.01.2023).

Egorov, V.A., Bartalev, S.A., Lupyan, E.A., Uvarov, I.A. (2006) Monitoring povrezhdenij rastitel'nogo pokrova po zharami po dannym sputnikovyh nablyudenij [Monitoring damage to vegetation by fires based on satellite observations], *Izvestiya vuzov, geodeziyai aerofotos'emka*, vol. 2, pp. 98-109.

Ershov, D.V., Korovin, G.N., Lupyan, E.A., Mazurov, A.A., Tashchilin, S.A. (2004) Rossijskaya sistema sputnikovogo monitoringa lesnyh pozharov [Russian satellite monitoring system for forest fires], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, no. 1, pp. 47-57.

Zharko, V.O., Bartalev, S.A. (2014) Ocenka raspoznavаемости drevesnyh porod lesa naosnove sputnikovyh dannyh o sezonnyh izmeneniyahih spektral'no-otrazhatel'nyh harakteristik [Estimation of recognizability of forest tree species based on satellite data on seasonal changes in their spectral-reflective characteristics], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 11, no. 3, pp. 159-170.

Lovitt, J., Richardson G., Rajaratnam K., Chen W., Leblanc S.G., He, L., Nielsen S.E., Hillman A., Schmelzer I., Arsenault, A. (2022) A New U-Net Based Convolutional Neural Network for Estimating Caribou Lichen Ground Cover from Field-Level RGB Images. *Can. J. Remote Sens.* vol. 48, no. 6, pp. 849-872.

Lupyan E.A., Bartalev S.A., Savin P.E. (2009) Tekhnologii sputnikovogo monitoringa v sel'skom hozyajstve Rossii [Satellite monitoring technologies in Russian agriculture], *Aerokosmicheskij kur'er*, no. 6, pp. 47-49.

Lupyan, E.A., Mazurov, A.A., Ershov, D.V., Korovin, G.N., Koroleva, N.V., Abushenko, N.A., Tashchilin, S.A., Suhinin, A.I., Afonin, S.V., Belov, V.V., Grishin, A.M., Solov'ev, V.S. (2007) Sputnikovyj monitoring lesov Rossii [Satellite monitoring of Russian forests], *Optika atmosfery i okeana*, vol. 20, no. 5, pp. 443-447.

Lupyan, E.A., Savin, I.Yu., Bartalev, S.A., Tolpin, V.A., Balashov, P.V., Plotnikov, D.E. (2011) Sputnikovyj servis monitorin gasostoyaniya rastitel'nosti («Vega») [Satellite service for monitoring the state of vegetation ("Vega")], *Sovremennyye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 8, no. 1, pp. 190-198.

Malinnikov, V.A., Stecenko, A.F., Altynov, A.E., Popov, S.M. (2008) *Monitoring prirodnoj sredy aerokosmicheskimi sredstvami. Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* [Monitoring of the natural environment by aerospace facilities. Textbook for students], Moscow, Russia, 145 p.

MGEIK (2006). *Rukovodyashchie principy MGEIK 2006 goda dlya nacional'nyh kadaстров парниковых газов* [IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for

National Greenhouse Gas Inventories], Tom 4, Sel'skoe hozyajstvo, lesnoe hozyajstvo I drugie vidy zemlepol'zovaniya, Programma MGEIK po nacional'nym kadas-tram parnikovyh gazov, MGEIK-IGES-OESR-MEA, IGES, Japan.

NDK (2023) *Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov Iz istochnikov I absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov, ne reguliruemymh Mon-real'skim protokolom za 1990- 2021 gg. v 2 tomah* [National Report on the Inven-tory of Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases Not Controlled by the Montreal Protocol, 1990-2021, 2 vol-umes], Moscow, Russia.

Nepoklonov, V.B., Habarov, D.A., Habarova, I.A. (2020) *Primenenie geoin-formacionnyh tekhnologij pri issledovanii izmenenij struktury zemlepol'zovaniya territorij po materialam mnogozonej kosmicheskoy s"emki* [The use of geoin-formation technologies in the study of changes in the structure of land use of terri-tories based on the materials of multi-zone satellite imagery], *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistemi tekhnologii)*, no. 2, avail-able at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-geoinformatsionnyh-tehnologiy-pri-issledovanii-izmenenij-struktury-zemlepolzovaniya-territoriy-po-materialam> (accessed: 01.12.2022).

Peresmotr rukovodyashchih principov RKIK OON dlya predstavleniya infor-macii o godovyh kadastrah Storon, vkluychennyh v prilozhenie I k Konvencii [Revision of the UNFCCC guidelines for reporting annual inventories of Parties included in Annex I to the Convention]. Dokument FCCC/CP/2013/10/Add.3, 2014, available at: <https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a03.pdf> (accessed 12.01.2023).

Plotnikov, D.E., Bartalev, S.A., Lupyan, E.A. (2010) *Priznaki raspozna-vaniya pahotnyh zemel' na osnove mnogoletnih ryadov dannyh sputnikovogo spek-troradiometra MODIS* [Signs of arable land recognition based on long-term data series of MODIS satellite spectroradiometer, *Sovremennye problemy distan-cionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 7, no. 1, pp. 330-341.

Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 08.11.2018 № 2418-R «O plane meropriyatij po sovershenstvovaniyu pravovogo regulirovaniya zemel'nyh otnoshenij» [Decree of the Government of the Russian Federation dated November 8, 2018, No. 2418-R “On the action plan to improve the legal regulation of land relations”].

Tematicheskoe deshifrirovaniye i interpretatsiya kosmicheskikh snimkov sred-nejgoi vysokogoprostranstvennogo razresheniya: uchebnoye posobie (2020) [The-matic interpretation and interpretation of space images of medium and high spatial resolution: textbook] A.N. Shihov, A.P. Gerasimov, A.I. Ponomarchuk, E.S. Permi-nova; Permskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet, Elek-tronnye dannye, Perm', Russia, 191 p.

Titova, A.G., Medvedev, A.A. (2021) *Zonirovaniye kontroliruyemykh I nekontroliruyemykh ob'yektov zakhroneniya kommunal'nykh otkhodov na*

osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya sverkhvysokogo razresheniya, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'yemka*, vol. 65, no. 6, pp. 634-646.

Shchepashchenko, D. G., Shvidenko, A. Z., Perger, K. (2017) Izucheniye fito-massy lesov: tekushcheye sostoyaniye i perspektivy , *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, № 4, p. 3-11.

Uchebno-metodicheskaya dokumentatsiya: Monitoring zemlepol'zovaniya [Educational and methodical documentation: Monitoring of land use] [Elektronnyj resurs] Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federacii Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie Vysshego obrazovaniya «Tyumenskij gosudarstvennyj universitet» Institut nauk o Zemle Kafedra kartografii geoinformacionnyh system, 2015, available at: Dokumentatsiya EKS YaNAO (yanao.ru) (accessed: 30.01.2023).

Neigh, C.S.R., Bolton, D.K., Diabate, M., Williams, J.J. (2014) Automated approach to map the history of forest disturbance from insect mortality and harvest with Landsat time-series data, *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 2782-2808. Bansal, A., Murtha, A.P., Wiart, R. (1991) An evaluation of Landsat thematic mapper data for reforestation monitoring in British Columbia, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 19, no 3, pp. 163-174.

Bartalev, S.A., Belward, A.S., Ershov, D.V., Isaev, A.S. (2003) A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no. 9, pp. 1977-1982.

Bartaley, S.A., Egorov, V.A., Loupian, E.A., Uvarov, I.A. (2007) Multi-Year Circumpolar Assessment the Area Burnt in Boreal Ecosystems Using SPOT-Vegetation, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no. 6, pp. 1397-1404.

Chen, Jun, Chen, Jin, Liao, A. et al. (2015) Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 103, pp. 7-27.

Copernicus Global Land Service, available at: <https://land.copernicus.eu> (дата обращения 11.01.2024).

DeFries, R.S., Houghton, R.A., Hansen, M.C., et al. (2002) Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99, p. 14256-14261.

Earth Map, available at: <https://earthmap.org> (дата обращения 10.01.2024).

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., et al. (2023) Global Carbon Budget 2023, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, pp. 5301-5369, <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>.

GLAD Landsat ARD Tools, available at: <https://glad.umd.edu/ard/home> (дата обращения 10.01.2024).

Global Forest Watch, available at: <https://www.globalforestwatch.org> (дата обращения 11.01.2024).

Hansen, M.C., Roy, D.P., Lindquist, E., Adusei, B., Justice, C.O., Altstatt, A. (2008) A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin, *Remote. Sens. Environ.*, no. 112, pp. 2495-2513.

Lovitt, J. Richardson G., Rajaratnam K., Chen W., Leblanc S.G., He, L., Nielsen S.E., Hillman A., Schmelzer I., Arsenault, A. (2022) A New U-Net Based Convolutional Neural Network for Estimating Caribou Lichen Ground Cover from Field-Level RGB Images, *Can. J. Remote Sens.* vol. 48, no. 6, pp. 849-872.

Nasiri, V., Deljouei, A., Moradi, F., et al. (2022) Land Use and Land Cover Mapping Using Sentinel-2, Landsat-8 Satellite Images, and Google Earth Engine: A Comparison of Two Composition Methods, *Remote Sensing*, vol. 14, pp. 1977.

Neigh, C.S.R., Bolton, D.K., Diabate, M., Williams, J.J. (2014) Automated approach to map the history of forest disturbance from insect mortality and harvest with Landsat time-series data, *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 2782-2808.

Open Foris, available at: <https://openforis.org/> (дата обращения 10.01.2023).

Pixel.Ai, available at: <https://www.pixel-ai.terratech.ru> (дата обращения 08.01.2023).

Potapov, P.V., Turubanova, S.A., Hansen, M.C., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., Mane, L., Justice, C.O. (2012) Quantifying Forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data, *Remote Sens. Environ.*, vol. 122, pp. 106-116.

Potapov, P., Hansen, M.C., Kommareddy, I., Kommareddy, A., Turubanova, S., Pickens, A., Adusei, B., Tyukavina, A., Ying, Q. (2020) Landsat Analysis Ready Data for Global Land Cover and Land Cover Change Mapping, *Remote Sens.*, no. 12, pp. 426, <https://doi.org/10.3390/rs12030426>.

Prince, S.D. (1991) A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, pp. 1313-1330.

Sun, G., Ranson, K. J., Guo, Z. et al. (2011) Forest biomass mapping from Lidar and radar synergies, *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, pp. 2906-2916.

Tzamtzis, I., Federici, A S., Hanle, L. (2019) Methodological Approach for a Consistent and Accurate Land Representation Using the FAO Open Foris Collect Earth Tool for GHG Inventories, *Carbon Management*, vol. 10, issue 3, pp. 437-450.

Wulder, M.A., Hermosilla, T., Stinson, G. et al. (2020) Satellite-based time series land cover and change information to map forest area consistent with national and international reporting requirements, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, vol. 93, issue 3, pp. 331-343.

Zhao, K., Popescu, S., Nelson, R. (2009) Lidar remote sensing of forest biomass: a scale-invariant estimation approach using airborne lasers, *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp. 182-196.

Статья поступила в редакцию (Received): 13.02.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 20.05.2024.

Для цитирования / Forcitation

Полумиева, П.Д., Трунов, А.А., Коротков, В.Н.. (2024) Возможности дистанционного зондирования Земли для оценки изменений в землепользовании, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 1-2, с. 140-165, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-140-165.

Polumieva, P.D., Trunov, A.A., Korotkov V.N. (2024) The possibility of remote sensing data for the land use, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXV, no. 1-2, с. 140-165, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-140-165.