

*На правах рукописи*

**Артамонов Григорий Евгеньевич**

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО И АЗОТНОГО СЛЕДА ПО  
ВЫБРОСАМ ГАЗОВ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В  
УСЛОВИЯХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Специальность: 1.5.15. Экология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на базе кафедры экологии ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»

**Научный руководитель:** **Гутников Владимир Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, и.о. руководителя филиала ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ)

**Научный консультант:** **Васенев Иван Иванович**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

**Официальные оппоненты:** **Колесников Сергей Ильич**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования ФГАОУ ВО «Южный Федеральный Университет»

**Саржанов Дмитрий Анатольевич**, кандидат биологических наук, научный сотрудник ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Курский государственный университет»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2023 в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.06 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел/факс: 8(499)976-21-84.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Отдел диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке им. Н.И. Железнова Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева и на сайте Университета: <https://www.timacad.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 35.2.030.06,  
кандидат биологических наук

Морев Д.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Одной из основных экологических проблем современности является глобальное изменение климата, имеющее циклический характер и региональные особенности межгодовых изменений, которые в значительной мере связаны с выбросами парниковых газов природного и антропогенного происхождения (Данилов-Данильян, 2021; Доклад ВМО: предварительное состояние глобального климата, 2022; Романовская и др., 2022).

Крупнейшими антропогенными источниками эмиссии парниковых газов являются генерирующие объекты тепловой энергетики (ТЭС), использующие уголь в качестве основного вида топлива (Куценко, 2013; Филиппова, Кульчурина, 2019; Иващенко, Нежевляк, 2021; Минкина, 2022).

Наземные экосистемы России обладают значительным ассимиляционным потенциалом для локализации и нейтрализации выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ (Васенев, 2018; Савич, 2021; Колесников, 2022; Кулагина и др., 2023), который зависит от физико-географических и природно-климатических особенностей территории (Сапожников, 2014; Кулижский, 2019; Гутников, 2022;).

Глобальный энергопереход формирует новые тренды для развития мировой энергетики и экономики, которые заключаются в минимизации выбросов парниковых газов и достижения баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением экосистемами – углеродной нейтральностью территории (Бушуев, 2021; Сычев, Налиухин, 2021).

Одним из инструментов оценки уровня антропогенного воздействия на экосистемы, является углеродный след (Нестерова, 2021). Парижское климатическое соглашение 2015 года активизировало деятельность, направленную на снижение углеродного следа в развитых странах. В ноябре 2021 года в г. Глазго на двадцать шестом климатическом саммите более 40 государств достигли договоренности отказаться от использования угля.

В России проблема необходимости сокращения выбросов парниковых газов определена в федеральном законе от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов». Актуальность исследований обусловлена возрастающей потребностью в анализе и учете экосистемного разнообразия территории страны для достижения Россией к 2060 году углеродной нейтральности территории, предусмотренной новой стратегией низкоуглеродного развития. Кроме того, Россия имеет обязательства по сохранению экосистемного и биологического разнообразия (Мосина, 2020), предусмотренные Конвенцией о биологическом разнообразии, принятой в Рио-де-Жанейро в 1992 году.

Оптимизация деятельности объектов тепловой энергетики, в части минимизации выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ, позволит Российской Федерации внести существенный вклад в переход к низкоуглеродному развитию мировой экономики, а также в международные усилия по сохранению окружающей среды и противодействию изменениям климата (Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года).

**Целью работы** является проведение экологической оценки углеродного и азотного следа по выбросам газов от генерирующих объектов тепловой энергетики в условиях Российской Федерации с анализом ассимиляционного потенциала наземных экосистем, находящихся в зонах непосредственного воздействия ТЭС, к поглощению антропогенного углерода и азота. Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

1. Формирование базы данных основных производственных, экологических и экосистемных показателей объектов тепловой энергетики с географической привязкой к типам наземных экосистем.

2. Типизация объектов тепловой энергетики на экосистемной основе по уровню воздействия их выбросов на окружающую среду.

3. Экологическая оценка углеродного следа исследуемых объектов ТЭС по материалам собранной базы данных.

4. Экологическая оценка азотного следа исследуемых объектов ТЭС по материалам собранной базы данных.

5. Экологическая оценка углеродного и азотного следа ТЭС в условиях г. Москвы с прогнозированием выбросов на 2035 год и анализ суммарного ассимиляционного потенциала московских ООПТ к поглощению антропогенного углерода и азота.

6. Оценка соответствия деятельности исследуемых объектов ТЭС «зеленым стандартам» в энергетике по выбросам парниковых газов.

**Научная новизна.** Осуществлена типизация объектов тепловой энергетики на ландшафтно-экологической основе, выявлены регионально-типологические закономерности и основные факторы разнообразия и пространственной изменчивости уровня воздействия выбросов антропогенного углерода (от 3 кг/га до 38 568,5 кг/га) и азота (от 10 кг/га до 41 252,1 кг/га) на наземные экосистемы, находящиеся в зоне непосредственного воздействия ТЭС.

Разработаны экологические обоснования дифференцированного подхода к перераспределению использования установленной мощности ТЭС, также выявлены объекты, имеющие резерв в повышении эффективности производственной деятельности.

Проанализирован ассимиляционный потенциал наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС, рассчитанный на основе индексов углеродной нагрузки (от 0,001 до 20,5) и азотной нагрузки (от 0,2 до 2195,1). Нагрузка отдельных ТЭС превышает ассимиляционные способности наземных экосистем к связыванию антропогенного углерода (до 20 раз) и антропогенного азота (до 2200 раз).

Проведена экологическая оценка ассимиляционного потенциала наземных экосистем ООПТ Москвы к воздействию локальных объектов ТЭС. Усредненный показатель выбросов антропогенного углерода и азота составляет 68,7 кг/га и 453,4 кг/га соответственно.

**Практическая значимость.** Полученные результаты дополняют информационно-методическое обеспечение экологических обоснований по выполнению сценариев стратегии низкоуглеродного развития России, а также

продления горизонта планирования Энергетической стратегии до 2050 г. В частности, они могут быть использованы в качестве методической основы для создания систем мониторинга и моделей прогнозирования в целях достижения Российской Федерацией углеродной нейтральности территории к 2060 году.

Основные положения и материалы исследования могут быть использованы для обоснования рационального выбора наилучших доступных мест строительства новых ТЭС, которые подлежат внесению в генеральную схему размещения объектов энергетики.

Разработанные и апробированные в ходе выполнения исследования информационно-методические положения, сформированная база данных ТЭС, а также полученные результаты могут быть использованы в качестве методической основы при разработке профильных модулей геоинформационных систем (ГИС) в области охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов. Это нашло частичное практическое применение при разработке федеральной государственной информационной системы: «Ведомственная Автоматизированная Интегрированная геоинформационная система автоматизации и информационной поддержки мониторинга и контроля использования земель сельскохозяйственного назначения Россельхознадзора» ГИС «Деметра» (уникальный идентификационный номер объекта учета – 10.0011826).

**Методология и методы исследования.** Проведенные исследования основываются на системном подходе к структурированию большого массива информации о деятельности 356 объектов тепловой энергетики из различных государственных и негосударственных источников: Минприроды России; Минэнерго России; Росреестр; Росприроднадзор; Росстат; АО «СО ЕЭС»; генерирующие компании и др., систематизированной в рабочей базе данных с географической привязкой к типам наземных экосистем, содержащей также основные производственные, технологические, экологические и экосистемные показатели, а также комплексном рассмотрении влияния выбросов CO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub> на наземные экосистемы. При решении частных задач исследования применены методы статистического анализа и классификации исследуемых объектов.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Наземные экосистемы, расположенные в зонах непосредственного воздействия газовых ТЭС малой установленной мощности (до 100 МВт), как правило, обеспечивают связывание выбросов антропогенного углерода и азота полностью, поскольку уровень антропогенной нагрузки от их выбросов сопоставим со скоростью обновления растительного и почвенного пулов этих экосистем.

2. Значительная зональная и региональная дифференциация ассимиляционного потенциала наземных экосистем к связыванию антропогенного углерода и азота в зоне непосредственного воздействия ТЭС должна учитываться при проектировании и определении мест строительства для новых ТЭС или оптимизации режимов их работы.

3. Значительная часть современных объектов тепловой энергетики может соответствовать требованиям «зеленых стандартов» в части выбросов парниковых газов в энергетике, что является важным элементом поэтапного достижения

углеродной нейтральности территории в Российской Федерации.

#### **Степень достоверности и апробация результатов работы.**

Достоверность результатов исследования подтверждается количеством наблюдений и современными методами исследования, которые соответствуют поставленным в работе целям и задачам. Выводы, сформулированные в диссертации, подкреплены фактическими данными, представленными в работе таблицах и рисунках. Статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных компьютерных программ и методов обработки информации.

Результаты исследования докладывались на международных и всероссийских научных конференциях (Москва 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2019; Санкт-Петербург, 2014; Вена, 2020; Севастополь, 2022; Воронеж, 2023).

**Публикации результатов исследований.** По теме исследования опубликовано 15 печатных работ, из них 7 – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК (1 в RSCI), 2 работы на английском языке в изданиях, цитируемых в реферативной базе данных «SCOPUS».

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, включающих обзор литературы, описание объектов и методов исследований, анализ результатов исследований, заключения и списка использованной литературы. Диссертационная работа изложена на 163 страницах, включая 44 таблицы и 37 рисунков. Список литературы состоит из 216 источников, в том числе 31 англоязычных.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю к.т.н., доценту Гутникову В.А. за неоценимую помощь в исследованиях и обсуждении полученных результатов. Особая благодарность д.б.н., профессору Васеневу И.И. за помощь в обсуждении данной работы и ценные советы. Автор также выражает благодарность всем сотрудникам, аспирантам и студентам кафедры экологии РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, всем сотрудникам Управления цифровой трансформации и информационной безопасности Россельхознадзора, а также своим родным и близким.

## **Глава 1. Обзор литературы: Экологическая оценка углеродного и азотного следа объектов тепловой энергетики**

Вопросы климатических изменений и регулирования выбросов парниковых газов за последнее десятилетие вышли в мире на новый уровень обсуждения. Проведенный анализ зарубежных и отечественных источников литературы показал, что общее ускоренное развитие региональных климатических изменений продемонстрировано материалами МГЭИК, ЮНЕП ООН, ВМО, а также данными национальных докладов о выбросах парниковых газов. Подтверждены лидирующие позиции энергетической отрасли, как являющейся одним из определяющих факторов нарастания объема парниковых газов в атмосфере (Данилов-Данильян, 2021; Романовская, 2022).

В последние годы в мире активно внедряется концепция углеродной нейтральности территорий, которая предусматривает балансовое соотношение

объема выбрасываемых парниковых газов и интенсивности их связывания экосистемами. Это может быть достигнуто путем компенсации выбросов углерода или путем улавливания выбросов в атмосфере (Кудеяров, 2018; Белова и др., 2020; Курганова и др., 2022). В России данное решение нашло свое отражение при создании стратегии низкоуглеродного развития до 2050, которая актуализирует задачи систематизации и разработки технологических решений и мер мотивации по снижению выбросов парниковых газов.

В Российских научных школах, занимающихся вопросами геохимии почвоведения и лесоводства, отработана методическая база и рассмотрены общие подходы для анализа климатических изменений, состояния наземных экосистем, их устойчивости к различным видам антропогенного воздействия (Алябина, 2007; Карпачевский, 2008; Урусевская и др., 2020). Накоплен экспериментальный материал по интенсивности связывания наземными экосистемами антропогенного углерода и азота (Титлянова и Базилевич, 2018; Огуреева и др., 2020).

Начиная с 2005 года на базе отчетов МГЭИК (IPCC: Synthesis Report, 2007, 2014, 2023) получает активное развитие методология анализа углеродного следа (Carbon footprint) как инструмента стимулирования сокращения выбросов парниковых газов, который отражает совокупность всех выбросов парниковых газов, произведенных прямо и косвенно отдельным человеком, организацией, мероприятием или продуктом (ГОСТ Р ИСО 14067-2021; Лагода, 2021).

Следует отметить, что гостированного определения понятия «азотный след» в России еще нет. Однако в последние годы вопросы нормирования выбросов антропогенного азота и его влияние на биоразнообразие биоценозов в наземных экосистемах обрели большую актуальность в мире, особенно в Европейских странах и Китае (Кудеяров, 2018; Li Yifei et al., 2023; Zuliani et al., 2023). Поэтому мы в своей работе ввели понятие «азотный след», имеющее схожее значение с углеродным следом. Далее в работе понятие азотного следа применяется для экологической оценки выбросов оксидов азота от деятельности объектов тепловой энергетики, выраженных в граммах выбросов  $\text{NO}_2$ , образующихся при производстве 1 кВтч электроэнергии (Артамонов, Гутников, Васенев, 2022).

Изложенные подходы требуют адаптации под задачи исследования, касающиеся экологической оценки углеродного и азотного следа с анализом ассимиляционных способностей наземных экосистем к поглощению антропогенного азота. Инструментом решения данных задач является разработка различных систем верификации расчетов углеродного и азотного следа (Уткин и др., 2006; 2021; Замолодчиков, 2021).

## **Глава 2. Объекты и методы исследования**

Объектами диссертационного исследования являются 356 объектов тепловой энергетики разного назначения (ГРЭС, ТЭЦ, промышленные ТЭС и ДЭС), находящиеся во владении 107 хозяйствующих субъектов и размещенные в наземных экосистемах, имеющих разный ассимиляционный потенциал к поглощению выбросов парниковых газов, что дифференцирует условия функционирования объектов тепловой энергетики (рис. 1).



**Рисунок 1. Расположение исследуемых ТЭС**

Суммарная установленная электрическая мощность исследуемых ТЭС составляет более 163 ГВт, среднегодовая выработка электроэнергии около 657 млрд. кВтч, что составляет 88 % от установленной мощности всех ТЭС России и 92 % в общем объеме производства электроэнергии на ТЭС в России. Средний показатель коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) составляет 45,8 %.

На первом этапе проведен сбор и структурирование по тематическим разделам информации о деятельности исследуемых ТЭС из различных государственных и негосударственных источников.

Затем с учетом специфики исследуемых объектов тепловой энергетики выбраны и верифицированы основанные на балансовых подходах алгоритмы экологической оценки углеродного и азотного следа на основе информации из «Экологического Атласа России» (2017) под редакцией Н.С. Касимова и В.С. Тикунова, информации о почвах из «Национального атласа почв Российской Федерации» (2011) под редакцией Г.В. Добровольского и С.А. Шобы, а также применены классические подходы ландшафтно-экологической классификации (Фридланд, 1988; Исаченко, 1985; Гудилин, 1980, Огуреева, 2018).

Далее проведена типизация объектов тепловой энергетики по трем диагностирующим признакам: тип ТЭС (I – ГРЭС, II – ТЭЦ, III – промышленные ТЭС, IV – ДЭС); основное топливо (a – газ, b – уголь, c – мазут, d – дизельное топливо); категории поселений по численности населения в соответствии с СП 42.133330.2016 (от 1 для городов-миллионников до 7 для поселков с населением менее 10 тыс. чел.), в которых расположены ТЭС.

Для оценки ассимиляционных способностей наземных экосистем использованы экспертные индикаторы состояния наземных экосистем (Гутников, 2015), рассчитанные за базовый период климатической нормы 1961-1990 гг., рекомендуемый всемирной метеорологической организацией: запасы сухой фитомассы на 1 м<sup>2</sup> в кг/м<sup>2</sup> (*Bo*) и запасы гумуса в 1 м<sup>2</sup> почвы в кг/м<sup>2</sup> (*Ho*).

Для расчета показателей углеродного и азотного следа производится сопоставление выбросов CO<sub>2</sub> или NO<sub>2</sub> с производством электроэнергии по формуле 1.1.

$$GHG_{fp} = \frac{E_{CO_2}}{E_g} \quad \text{или} \quad NO_{fp} = \frac{E_{NO_2}}{E_g} \quad (1.1)$$

где:

*GHG<sub>fp</sub>* – выбросы CO<sub>2</sub> при производстве 1 кВтч электроэнергии на конкретной ТЭС (углеродный след), г. CO<sub>2</sub>е/кВтч;

*NO<sub>fp</sub>* – выбросы NO<sub>2</sub> при производстве 1 кВтч электроэнергии на конкретной ТЭС (азотный след), г. NO<sub>2</sub>/кВтч;

*E<sub>CO2</sub>* – фактические выбросы CO<sub>2</sub>, тонн/год;

*E<sub>NO2</sub>* – фактические выбросы NO<sub>2</sub>, тонн/год;

*E<sub>g</sub>* – годовое производство электроэнергии на конкретной ТЭС, млн. кВтч/год.

Для оценки ассимиляционного потенциала наземных экосистем к поглощению выбросов антропогенного углерода и азота последовательно рассчитаны запасы органического углерода и азота в фитомассе и почвенном покрове наземных экосистем. Расчет произведен на основе показателей запасов сухой фитомассы (*Bo*) и запасов гумуса в почве (*Ho*) с учетом анализируемого вида фитоценоза и соответствующей ему структуры почвенного покрова в границах зоны непосредственного воздействия ТЭС по формулам 1.2 и 1.3.

$$C_{Bi} = (Bo_i * 0,5) * S \quad \text{или} \quad N_{Bi} = (Bo_i * 0,5 * \frac{N}{C}) * S \quad (1.2)$$

$$C_{Sj} = (Ho_j * 0,58) * S \quad \text{или} \quad N_{Sj} = (Ho_j * 0,58 * \frac{N}{C}) * S \quad (1.3)$$

где:

*Bo<sub>i</sub>* – запасы сухой фитомассы, кг/м<sup>2</sup>;

*Ho<sub>j</sub>* – запасы гумуса в почве, кг/м<sup>2</sup>;

*C<sub>Bi</sub>* – запасы органического углерода в фитомассе, кг;

*N<sub>Bi</sub>* – запасы органического азота в фитомассе, кг;

*C<sub>Sj</sub>* – запасы органического углерода в почвенном покрове, кг;

*N<sub>Sj</sub>* – запасы органического азота в почвенном покрове, кг;

0,5 и 0,58 – коэффициенты для перевода *Bo<sub>i</sub>* и *Ho<sub>j</sub>* в органический углерод;

*S* – площадь зоны непосредственного воздействия конкретной ТЭС, м<sup>2</sup>;

*N/C* – соотношение углерода к азоту характерное для исследуемых видов фитоценозов (используется только при расчетах запасов органического азота).

Зона непосредственного воздействия ТЭС оценивается как сумма площадей относительно однородных (по растительности и почвам) участков земель, используемых ТЭС и на площади нормированных санитарно-защитных зон в соответствии с новой редакцией СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03.

С учетом различий в скорости обновления органического углерода и азота рассчитаны усредненные показатели годичного обновления углерода и азота в фитомассе и почвенном покрове по формулам 1.4 и 1.5.

$$C_{Bai} = \left(\frac{C_{Bi}}{T_{Bi}}\right) \quad \text{или} \quad N_{Bai} = \left(\frac{N_{Bi}}{T_{Bi}}\right) \quad (1.4)$$

$$C_{Saj} = \left(\frac{C_{Sj}}{T_{Sj}}\right) \quad \text{или} \quad N_{Saj} = \left(\frac{N_{Sj}}{T_{Sj}}\right) \quad (1.5)$$

где:

$C_{Bai}$  – усредненный показатель годичного обновления углерода в фитомассе, кг/год;

$C_{Saj}$  – усредненный показатель годичного обновления углерода в почвенном покрове, кг/год;

$N_{Bai}$  – усредненный показатель годичного обновления азота в фитомассе, кг/год;

$N_{Saj}$  – усредненный показатель годичного обновления азота в почвенном покрове, кг/год;

$T_{Bi}$  – средний период обновления лесной фитомассы (по умолчанию условно принимается за 100 лет и в будущем может экспериментально уточняться для различных видов наземных экосистем).

$T_{Sj}$  – средний период обновления почвенного гумуса в верхних горизонтах почв (по умолчанию условно принимается за 1000 лет и в будущем может экспериментально уточняться для различных видов почв).

Суммарные показатели годичного обновления органического углерода и азота в наземных экосистемах ( $C_{Ta}$  и  $N_{Ta}$  кг/год) рассчитаны как сумма усредненных показателей годичного обновления углерода и азота в фитомассе всех выделенных в зоне воздействия ТЭС видов фитоценозов ( $i=n$ ) и структур почвенного покрова ( $j=k$ ) по формуле 1.6.

$$C_{Ta} = \sum_{i=1}^n(C_{Bai}) + \sum_{j=1}^k(C_{Saj}) \quad \text{или} \quad N_{Ta} = \sum_{i=1}^n(N_{Bai}) + \sum_{j=1}^k(N_{Saj}) \quad (1.6)$$

Для дифференцированного учета удельных нагрузок выбросов антропогенного углерода и азота на наземные экосистемы в зоне непосредственного воздействия ТЭС, использованы индексы углеродной и азотной нагрузки, рассчитанные на основе балансового метода с учетом коэффициентов пересчета на основе молярных масс по формуле 1.7.

$$I_{LC} = \frac{(E_{CO_2}/COEF)}{C_{Ta}} \quad \text{или} \quad I_{LN} = \frac{(E_{NO_2}/COEF)}{N_{Ta}} \quad (1.7)$$

где:

$I_{LC}$  – индекс углеродной нагрузки;

$I_{LN}$  – индекс азотной нагрузки;

$E_{CO_2}$  – фактические выбросы  $CO_2$ , кг/год;

$E_{NO_2}$  – фактические выбросы  $NO_2$ , кг/год;

COEF – коэффициенты для пересчета выбросов  $CO_2$  или  $NO_2$  в антропогенный углерод или азот (3,67 и 3,28 соответственно);

$C_{Ta}$  – показатель годичного обновления органического углерода в наземных экосистемах в зоне непосредственного воздействия ТЭС, кг/год.

$N_{Ta}$  – показатель годичного обновления органического азота в наземных экосистемах в зоне непосредственного воздействия ТЭС, кг/год.

Полученные результаты прошли верификацию на локальном уровне в г. Москве по данным ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» с экологической оценкой суммарного ассимиляционного потенциала московских ООПТ к поглощению антропогенных выбросов ТЭЦ и прогнозированием выбросов загрязняющих веществ на 2035 год.

В работе также осуществлена оценка соответствия деятельности ТЭС «зеленым стандартам» в энергетике по критериям 2.2.2.1, 2.2.3 «адаптационных проектов» и 2.3.2.1 «зеленых проектов», утвержденных Постановлением

Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587. Критериями предусмотрены 3 группы: I – Объекты электрогенерации (ГРЭС); II – Объекты когенерации, использующие твердое топливо (угольные ТЭЦ); III – Объекты когенерации, использующие газообразное топливо (газовые ТЭЦ). Целевые значения показателей выбросов парниковых газов на единицу электроэнергии: группа I – 810 г. CO<sub>2</sub> е/кВтч; группа II – 950 г. CO<sub>2</sub> е/кВтч; группа III – 450 г. CO<sub>2</sub> е/кВтч. Целевые значения для соответствия п. 2.3.2.1 «зеленых проектов» в разделе «электрогенерация на природном газе (включая сжиженный природный газ)» – прямые выбросы парниковых газов при генерации – менее 100 г. CO<sub>2</sub>е/кВтч.

### **Глава 3. Регионально-типологические особенности объектов тепловой энергетики России**

Ландшафтно-экологическая типизация объектов тепловой энергетики представляет собой важную составляющую территориального планирования в области энергетики, нацеленного на организацию эффективной и экологически безопасной инфраструктуры энергоснабжения и рационального использования природных ресурсов с учетом ассимиляционных способностей экосистем.

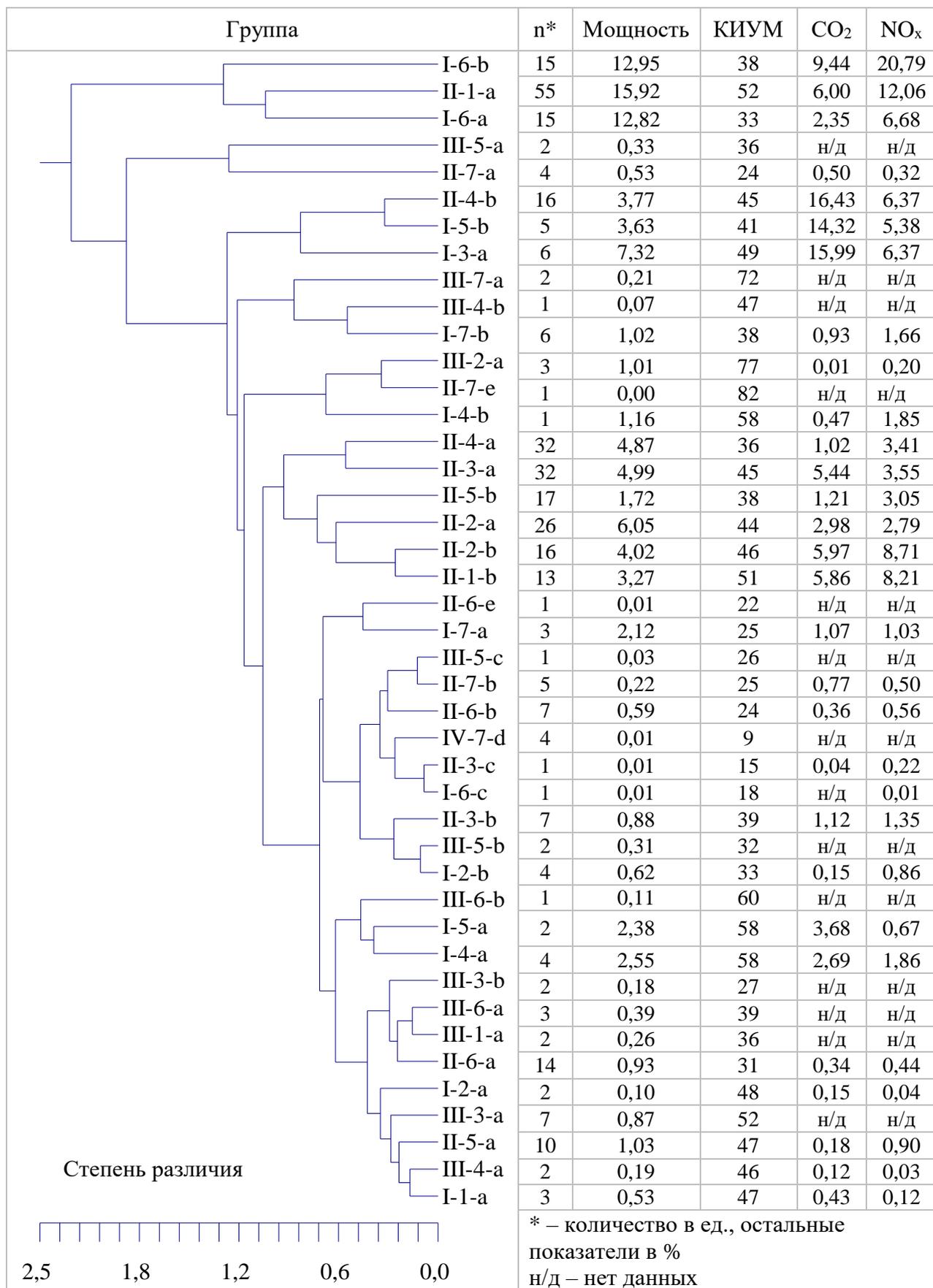
Проведенный иерархический кластерный анализ основных производственных и экологических показателей (мощность, производство электроэнергии, КИУМ, удельный расход топлива, запасы фитомассы, запасы гумуса, выбросы CO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>, площадь зоны воздействия) позволил разделить исследуемые объекты тепловой энергетики на 4 группы (ГРЭС, ТЭЦ, промышленные и ДЭС) и 43 функционально-экологические подгруппы (рис. 2).

Определились кластеры объектов, имеющие одинаковые типы объектов энергетики, вид используемого топлива и близкие значения численности населения поселений, в которых расположены объекты. Например, подгруппы II-3-а и II-4-а, II-1-б и II-2-б, I-4-а и I-5-а. В кластер также объединились подгруппы II-3-с и I-6-с, представляющие собой разные типы объектов, но использующие одинаковый вид топлива – мазут. В большинстве случаев подгруппы газовых и угольных объектов оказались в разных кластерах.

Подгруппы ГРЭС I-6-б, I-3-а, I-4-б и I-2-а не попали в кластеры, что говорит об их уникальности, обусловленной в первую очередь высокой установленной мощностью объектов и высокими показателями выбросов CO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub>. Подгруппа дизельных электростанций IV-7-d также не попала в кластер, что подчеркивает уникальность данных объектов энергетики.

В нижней части дендрограммы разместились в основном подгруппы с промышленными ТЭС. В общие кластеры объединились только подгруппы III-1-а и III-6-а, остальные подгруппы промышленных ТЭС либо не вошли в кластер, либо объединились с подгруппами других видов объектов.

Выявлены регионально-типологические закономерности и основные факторы разнообразия и пространственной изменчивости исследуемых объектов ТЭС. Решающее влияние имеют тип наземных экосистем, площадь зоны непосредственного воздействия и установленная мощность. Факторами второго порядка являются вид используемого топлива и КИУМ.



**Рисунок 2. Иерархический кластерный анализ производственных и экологических показателей подгрупп ТЭС с оценкой удельного веса основных факторов дифференциации**

## Глава 4. Экологическая оценка углеродного следа объектов тепловой энергетики России

Анализ динамики выбросов парниковых газов (переведены в CO<sub>2</sub>-экв.) в секторе «Энергетика» с 1990 по 2020 годы показывает их определенную цикличность, которая связана с климатическими флуктуациями и тенденцией изменения уровня развития генерации электроэнергии на ТЭС в рассматриваемые годы (рис. 3) (Нац. доклад о кадастре выбросов парниковых газов за 1990 – 2020 гг., 2022). Отмечается общий тренд на снижение выбросов парниковых газов, который описывается логарифмической функцией.

В 1990-е годы отмечалось качественное снижение количества выбросов углекислого газа, что было связано с общим снижением промышленного производства на фоне последствий распада СССР. С 2000-х наблюдается незначительный рост выбросов парниковых газов. В 1998, 2009 и 2020 годах просматривается локальное снижение выбросов парниковых газов, связанное с финансовыми и экономическими факторами.

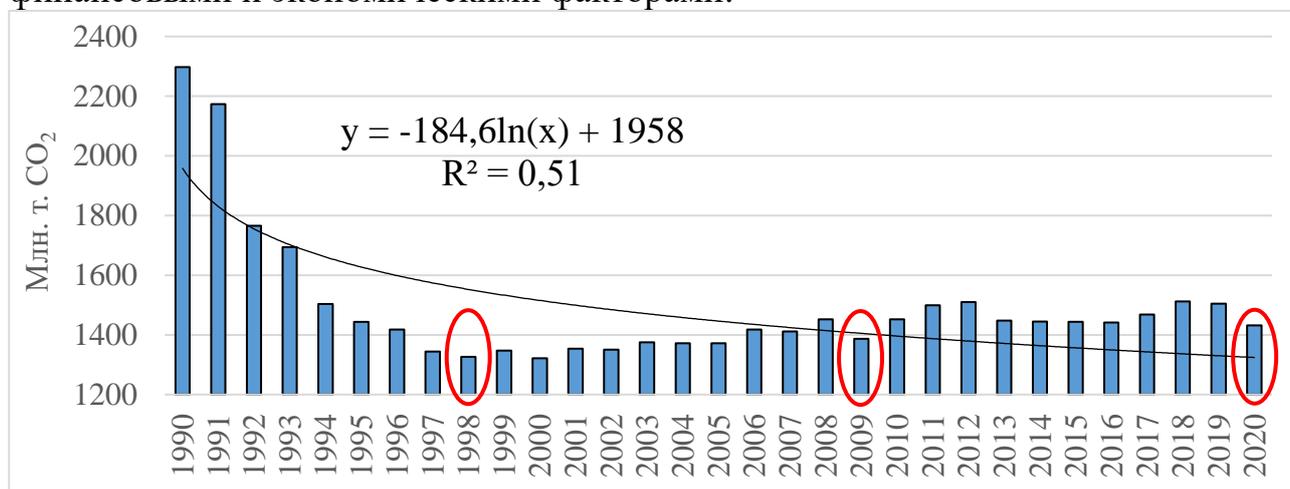


Рисунок 3. Динамика выбросов CO<sub>2</sub> в секторе «Энергетика» млн. тонн в 1990-2020 гг.

Проведенная экологическая оценка углеродного следа, рассчитанного по формуле 1.1 показала, что в России имеются хорошие перспективы реализации сценариев углеродной стратегии России и постепенного перехода субъектов РФ к уровню углерод-нейтральных территорий. Большинство исследуемых ТЭС соответствует критериям «адаптационным проектов», при этом критериям «зеленых проектов» не соответствует Томская ТЭЦ-1, которая работает в режиме котельной и осуществляет в основном теплоснабжение ( $GHG_{fp} = 134,7$  г. CO<sub>2</sub>е/кВтч, при целевом значении – менее 100 г. CO<sub>2</sub>е/кВтч).

Индекс углеродной нагрузки ( $I_{LC}$ ), рассчитанный по формуле 1.7, фактически представляет собой балансовое соотношение поступающего в наземные экосистемы антропогенного углерода в дополнение к ежегодно обновляемому органическому углероду. Данный индекс является важным агрегированным показателем, позволяющим оценивать ассимиляционные способности наземных экосистем к поглощению разного уровня выбросов антропогенного углерода. Чем

выше  $I_{LC}$ , тем ниже ассимиляционный потенциал наземных экосистем к поглощению антропогенного углерода (Артамонов, Гутников, Васенев, 2022).

Из общей генеральной совокупности исследуемых объектов энергетики, в качестве репрезентативной выборки, выбраны 25 представительных ТЭС различной установленной мощности, функционирующие в разных природно-климатических условиях и дифференцированные по индексу углеродной нагрузки. Результаты расчета  $I_{LC}$  показали широкий диапазон его значений (от 0,0008 до 20,6). Исследуемые ТЭС разделены на 5 групп с использованием шкалы дифференциации углеродной нагрузки. (табл. 1).

**Таблица 1. Экологическая оценка ТЭС по уровню углеродной нагрузки на наземные экосистемы в зоне их воздействия**

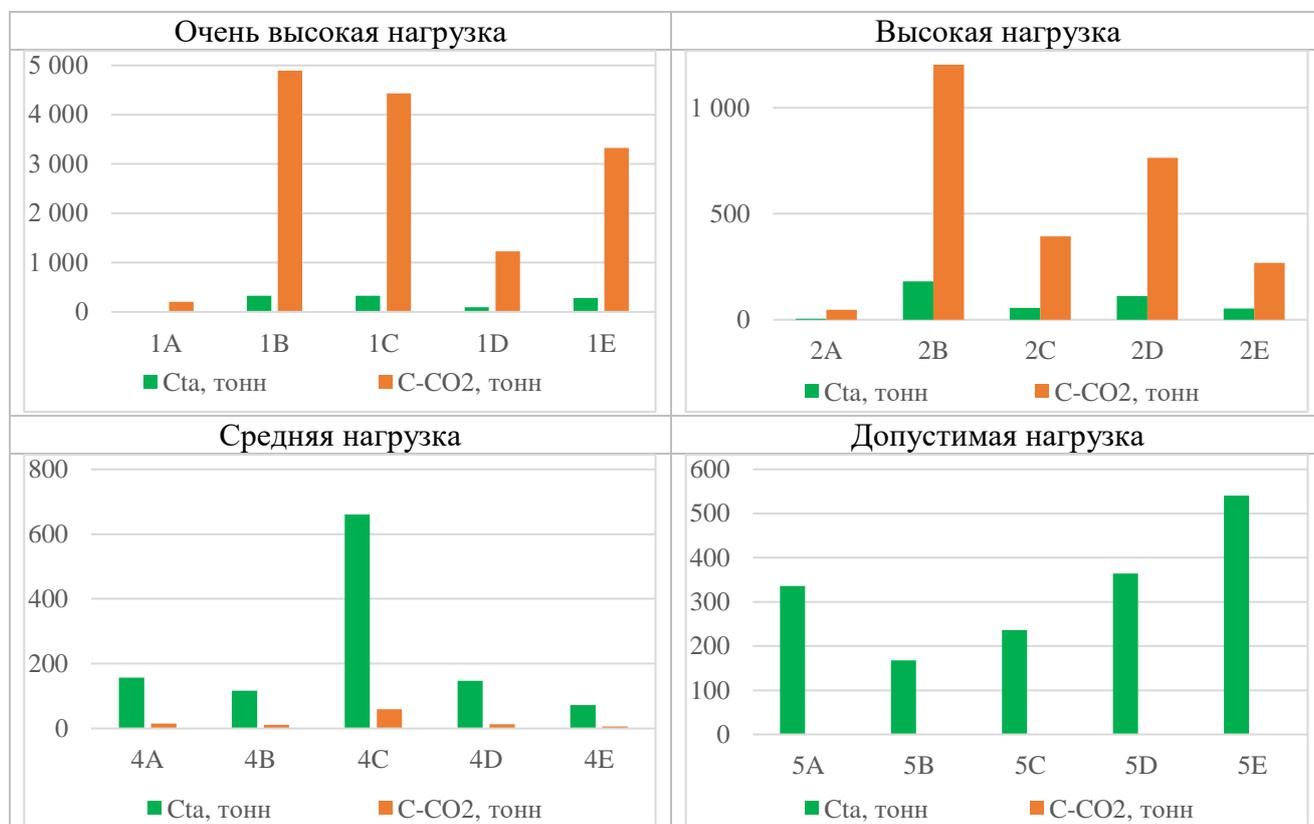
Станция	index	$I_{LC}$	Мощность, МВт	Выбросы $CO_2$ , тонн	Зона воздействия, га*	Биом
<b>Очень высокая (<math>I_{LC}</math> более 10)</b>						
Астраханская ТЭЦ-2	1А	20,578	380	760,6	70,0	Прочие земли
Сургутская ГРЭС-2	1В	15,082	5657	17 950,1	186,5	Северная тайга
Благовещенская ТЭЦ	1С	13,645	400	16 273,4	150,3	Смеш. и листв. леса
Курганская ТЭЦ	1D	12,725	450	4 511,5	142,5	Луга, пастб., пашни
Бийская ТЭЦ	1Е	11,680	535	12 198,8	135,2	Луга, пастб., пашни
<b>Высокая (<math>I_{LC}</math> от 10 до 1)</b>						
Астраханская ПГУ-235	2А	8,783	235	172,9	37,3	Прочие земли
Невинномысская ГРЭС	2В	7,029	1530	4 687,5	86,8	Луга, пастб., пашни
Читинская ТЭЦ-1	2С	6,938	452	1 445,7	118,0	Средняя тайга
Южно-Кузбасская ГРЭС	2D	6,840	554	2 803,4	114,2	Средняя тайга
Томская ТЭЦ-1	2Е	5,069	14,7	983,7	29,8	Южная тайга
<b>Повышенная (<math>I_{LC}</math> от 1 до 0,1)</b>						
Тюменская ТЭЦ-2	3А	0,993	755	1 147,1	191,7	Смеш. и листв. леса
Красноярская ТЭЦ-2	3В	0,824	465	504,4	145,7	Средняя тайга
Охинская ТЭЦ	3С	0,816	99	287,6	42,2	Средняя тайга
Ново-Свердловская ТЭЦ	3D	0,803	557	388,1	93,6	Южная тайга
Уфимская ТЭЦ-3	3Е	0,795	113	256,1	44,3	Смеш. и листв. леса
<b>Средняя (<math>I_{LC}</math> от 0,1 до 0,01)</b>						
Ново-Стерлитамакская	4А	0,098	255	56,6	63,0	Луга, пастб., пашни
Ефремовская ТЭЦ	4В	0,092	160	39,3	42,6	Луга, пастб., пашни
Владивостокская ТЭЦ-2	4С	0,090	497	218,4	117,1	Смеш. и листв. леса
Курская ТЭЦ-1	4D	0,090	175	48,7	57,1	Смеш. и листв. леса
Белгородская ТЭЦ	4Е	0,089	60	23,6	37,4	Луга, пастб., пашни
<b>Допустимая (<math>I_{LC}</math> менее 0,01)</b>						
Псковская ГРЭС	5А	0,003	440	3,1	134,3	Южная тайга
Ульяновская ТЭЦ-2	5В	0,003	417	1,6	141,3	Луга, пастб., пашни
Челябинская ТЭЦ-3	5С	0,002	580	1,6	139,2	Луга, пастб., пашни
Березниковская ТЭЦ-2	5D	0,001	98	1,6	56,5	Южная тайга
Смоленская ГРЭС	5Е	0,001	630	1,6	144,2	Смеш. и листв. леса

\* - СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03

Важно отметить большую вариативность показателя «выбросы антропогенного углерода на единицу площади» для всех 5 групп. В группе с «очень высокой» углеродной нагрузкой показатель доходит до 29 тонн/га. При этом, в группе с «допустимой» углеродной нагрузкой показатель имеет значение всего 3 кг/га. Для нейтрализации высоких показателей выбросов антропогенного углерода

на единицу площади требуются дополнительные площади наземных экосистем с учетом их ассимиляционного потенциала.

Диаграммы соотношения баланса показателей выбросов антропогенного углерода и суммарного показателя годичного обновления органического углерода  $C_{Ta}$  визуализируют масштаб различий в ассимиляционных способностях наземных экосистем для групп с различным уровнем углеродной нагрузки (рис. 4).



**Рисунок 4.** Соотношение показателей выбросов ( $C-CO_2$ ) и обновления органического углерода ( $C_{Ta}$ ) для групп ТЭС с различной углеродной нагрузкой из таблицы 1

Группа с «очень высокой» углеродной нагрузкой представлена в основном угольными ТЭС, имеющими наибольшие значения выбросов  $CO_2$ . Наиболее яркие представители расположены в биомах северной тайги, смешанных и лиственных лесов и лугах, пастбищах и пашнях.

Группа объектов с «допустимой» углеродной нагрузкой представлена в основном газовыми ТЭС, расположенными в крупных городах, имеющими невысокие значения выбросов углекислого газа. Наиболее яркие представители расположены в зоне южной тайги и лугах, пастбищах и пашнях.

К сожалению, нагрузка от выбросов антропогенного углерода на отдельные наземные экосистемы, находящиеся в зоне непосредственного воздействия ТЭС, демонстрирует ярко выраженные нарушения баланса фотосинтеза и дыхания фитоценозов (углеродного баланса). Для смягчения последствий дисбаланса требуется наличие в непосредственной близости наземных экосистем с фитоценозами, имеющими повышенные возможности поглощения углерода, выражающимися посредством увеличения индекса листовой поверхности (leaf-area index) (Mndela et al., 2022).

## Глава 5. Экологическая оценка азотного следа объектов тепловой энергетики России

Наряду с экологической оценкой углеродного следа, другим химическим элементом, который важно учитывать при различных экологических оценках антропогенного воздействия ТЭС является антропогенный азот, в частности, выбросы оксидов азота  $\text{NO}_x$ . Чрезмерное поступление антропогенного азота в наземные экосистемы оказывает влияние на состояние биоразнообразия (Valentini et al., 2014; Васенев и др., 2018).

Рассчитанный по формуле 1.1 показатель азотного следа существенно отличаются от значений углеродного следа. Выбросы оксидов азота превышают выбросы углекислого газа ввиду особенностей технологического процесса по сжиганию природного газа и угля в котлах ТЭС. Среднее соотношение выбросов  $\text{NO}_2$  и  $\text{CO}$ , фиксируемое в отчетности 2-ТП (воздух) среди исследуемых ТЭС составляет 6 к 1 (при пересчете  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$  – соотношение 5 к 1) (ИТС 38-2022. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии», 2022).

Индекс азотной нагрузки ( $I_{LN}$ ), рассчитанный по формуле 1.7, фактически представляет собой балансовое соотношение поступающего в наземные экосистемы антропогенного азота в дополнение к ежегодно обновляемому органическому азоту. Данный индекс является важным агрегированным показателем, позволяющим оценивать ассимиляционные способности наземных экосистем к восприятию разного уровня выбросов антропогенного азота. Чем выше  $I_{LN}$ , тем ниже ассимиляционный потенциал наземных экосистем к поглощению антропогенного азота (Артамонов, Гутников, Васенев, 2022).

Из общей генеральной совокупности исследуемых объектов энергетики, в качестве репрезентативной выборки, выбраны 21 представительные ТЭС, функционирующие в разных природно-климатических условиях. Результаты расчета  $I_{LN}$  показали широкий диапазон его значений (от 0,2 до 2195), что значительно отличается от показателей индекса углеродной нагрузки. Исследуемые ТЭС разделены на 5 групп с использованием шкалы дифференциации азотной нагрузки (табл. 2).

Важно отметить о большой вариативности показателя «выбросы антропогенного азота на единицу площади» в рассматриваемых группах. Так, в группе с «чрезвычайно высокой» азотной нагрузкой значение показателя доходит до 41 тонн/га. Для нейтрализации таких выбросов потребуется дополнительно 676 тыс. гектаров наземных экосистем, обладающих аналогичным ассимиляционным потенциалом. Для сравнения вся площадь Москвы составляет 256 тыс. га. При этом в группе с допустимой азотной нагрузкой показатель имеет значение всего 10 кг/га, что соответствует европейским нормативам антропогенного воздействия азота, которое составляет 30 кг/га (Krumins et al., 2023; Pelletier et al., 2013).

Как и в случае углерода, группа с «чрезвычайно высокой» азотной нагрузкой представлена угольными ТЭС, имеющими наибольшие значения выбросов оксидов азота. Наиболее яркие представители расположены в биомах южной, средней и северной тайги, смешанных и лиственных лесов, лугах, пастбищах и пашнях.

**Таблица 2. Экологическая оценка ТЭС по уровню азотной нагрузки на наземные экосистемы в зоне их воздействия**

Станция	<i>index</i>	$I_{LN}$	МВт	Выбросы NO <sub>2</sub> , тонн	Зона воздействия, га*	Биом
<b>Чрезвычайно высокая (<math>I_{LN}</math> более 1000)</b>						
Рефтинская ГРЭС	1А	2 195,1	3800	66 571	492,0	Южная тайга
Омская ТЭЦ-5	1В	1 905,5	735	13 968	148,4	Луга, пастб., пашни
Сургутская ГРЭС-2	1С	1 788,7	5657	24 199	186,5	Северная тайга
Читинская ТЭЦ-1	1D	1 465,6	452	3 736	118,0	Средняя тайга
Ново-Иркутская ТЭЦ	1E	1 226,9	705	8 913	138,7	Смешан. и листв. леса
<b>Очень высокая (<math>I_{LN}</math> от 1000 до 100)</b>						
Автозаводская ТЭЦ	2А	989,0	580	5 228	44,8	Смешан. и листв. леса
Иркутская ТЭЦ-6	2В	974,2	270	4 656	96,2	Средняя тайга
Западно-Сибирская ТЭЦ	2С	931,2	600	7 961	121,1	Луга, пастб., пашни
Улан-Удэнская ТЭЦ-1	2D	924,8	148	2 394	104,7	Луга, пастб., пашни
Ново-Свердловская ТЭЦ	2E	918,9	557	5 301	93,6	Южная тайга
<b>Высокая (<math>I_{LN}</math> от 100 до 10)</b>						
Саратовская ГРЭС	3А	99,8	54	233	35,2	Луга, пастб., пашни
ТЭЦ-11	3В	95,4	330	644	46,5	Смешан. и листв. леса
Шерловогорская ТЭЦ	3С	94,4	12	59	38,1	Прочие земли
Краснодарская ТЭЦ	3D	93,9	1091	2 566	108,0	Луга, пастб., пашни
Партизанская ГРЭС	3E	93,0	203	2 449	105,9	Смешан. и листв. леса
<b>Средняя (<math>I_{LN}</math> от 10 до 1)</b>						
Дорогобужская ТЭЦ	4А	9,8	128	173	82,3	Смешан. и листв. леса
Курская ТЭЦ (СЗР)	4В	9,7	116	97,6	35,7	Смешан. и листв. леса
Адлерская ТЭС	4С	8,1	351	62,5	37,9	Смешан. и листв. леса
Джубгинская ТЭС	4D	5,0	200	25,0	40,3	Луга, пастб., пашни
Камчатская ТЭЦ-2	4E	4,9	163	83,4	53,0	Смешан. и листв. леса
<b>Допустимая (<math>I_{LN}</math> менее 1)</b>						
Калужская ТЭЦ	5А	0,2	41,8	1,1	30,2	Смешан. и листв. леса

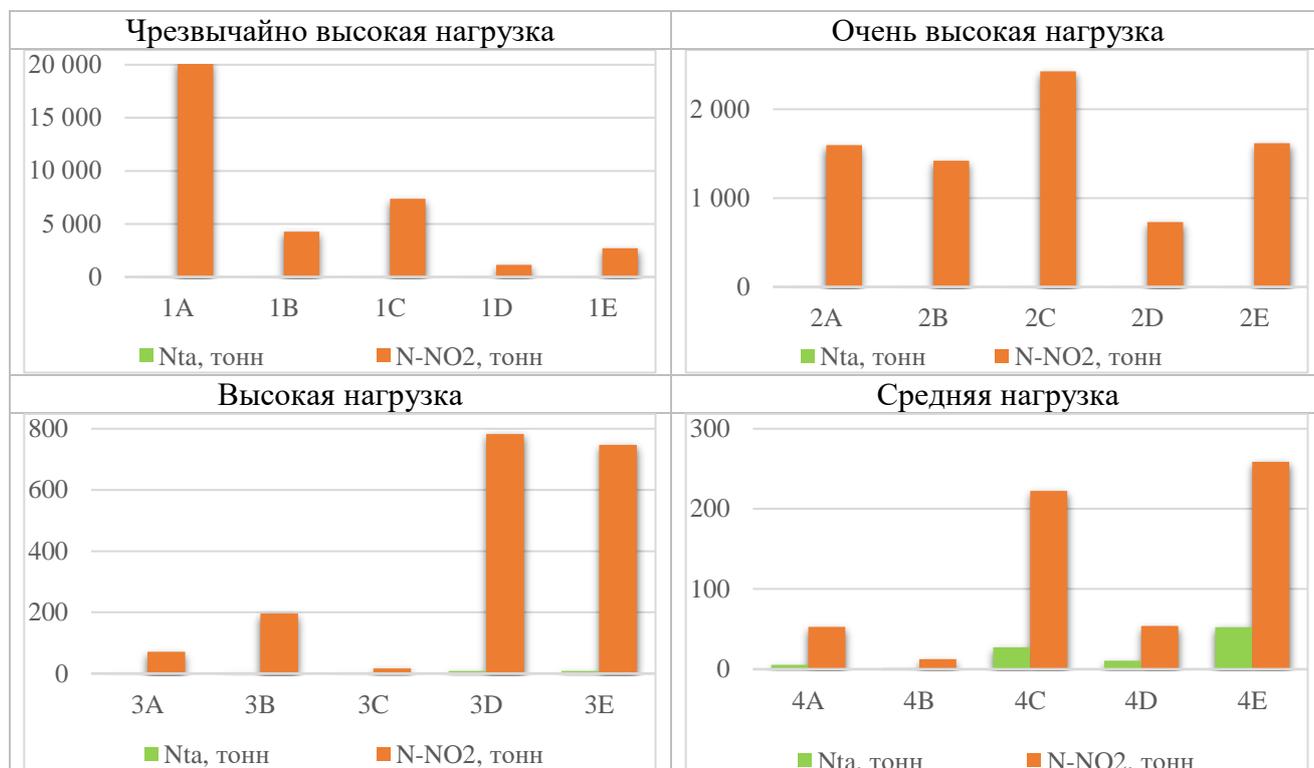
\* - СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03

В группу с «допустимой» азотной нагрузкой попала только 1 газовая электростанция – Калужская ТЭЦ, расположенная в г. Калуга, имеющая невысокую мощность (41,8 МВт) и низкие объемы выбросов NO<sub>2</sub> (1,1 тонн), кроме того, она фактически работает в режиме котельной, показатель КИУМ составляет всего 3,6 %. Зона непосредственного воздействия Калужской ТЭЦ составляет 30 га и расположена в смешанных и лиственных лесах.

Диаграммы соотношения баланса показателей выбросов антропогенного азота и суммарного показателя годичного обновления органического азота в экосистемах  $N_{Ta}$  визуализируют масштаб различий в ассимиляционных способностях наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС для групп с различным уровнем азотной нагрузки (рис. 5).

В целом азотная нагрузка на наземные экосистемы имеет более значительные показатели, чем углеродная нагрузка. Нагрузка от выбросов антропогенного азота на абсолютное большинство наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС, превышает порог их самовосстановления и нарушает азотный баланс в фитоценозах и почвах, что в свою очередь приводит к

деградации наземных экосистем и негативным образом влияет на состояние биоразнообразия. Близлежащие компенсирующие лесные территории, вероятно, позволят частично нейтрализовать воздействие от выбросов антропогенного азота за счет его вовлечения в биогеохимический круговорот (Комаров, 2007).



**Рисунок 5. Соотношение показателей выбросов ( $N-NO_2$ ) и обновления органического азота ( $N_{ta}$ ) для групп ТЭС с различной азотной нагрузкой из таблицы 2**

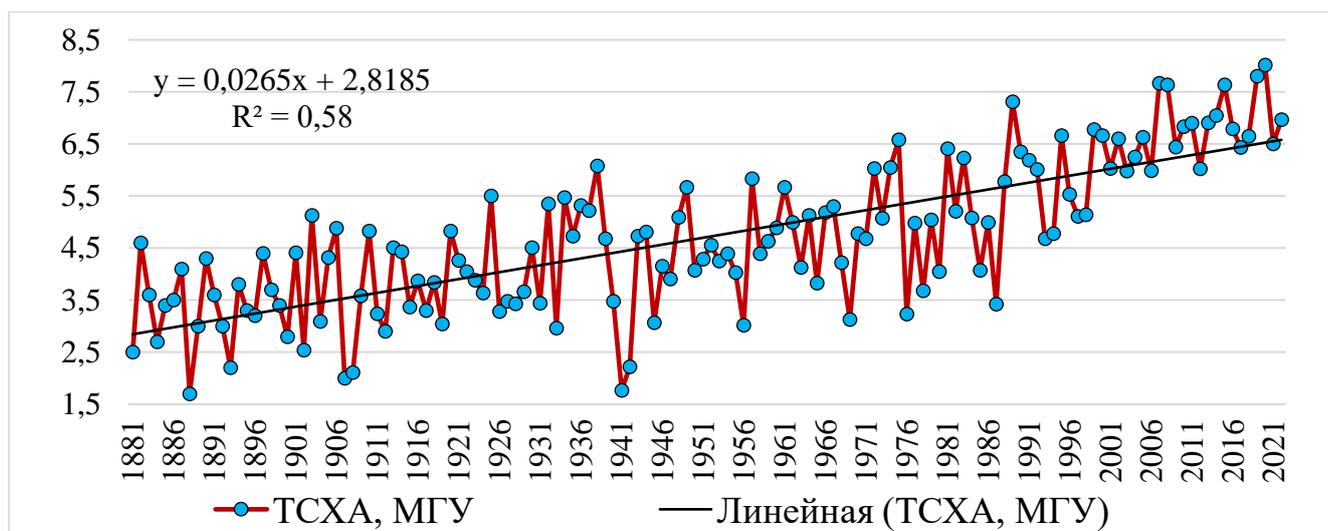
## **Глава 6. Экологическая оценка углеродного и азотного следа объектов тепловой энергетики в условиях Москвы**

Межгодовая динамика изменения климата Москвы имеет сезонный циклический характер и особенности межгодовых изменений на фоне общего тренда среднегодового потепления (рис. 6), которая может быть связана с выбросами парниковых газов антропогенного происхождения. Это можно проиллюстрировать на примере линейного тренда температуры приземного слоя атмосферного воздуха в Москве по данным наблюдений метеорологической обсерватории имени В.А. Михельсона в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева с 1881 и метеорологической обсерватории МГУ им М.В. Ломоносова с 1961-2022 гг.

Динамика среднегодовой температуры воздуха за рассматриваемый период имеет устойчивый тренд на увеличение, который описывается линейной функцией  $y = 0,0265x + 2,8185$  с коэффициентом детерминации:  $R^2 = 0,58$ . В целом, за XX столетие средняя годовая температура воздуха в Москве повысилась на  $2,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура холодного и летнего периодов соответственно на  $3,18\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $1,12\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Исаев и др., 2002).

Согласно новой экологической политике Москвы на период до 2030 года одним из приоритетных вопросов являются сокращение выбросов парниковых

газов и обеспечение поэтапного перехода к энергоэффективной и низкоуглеродной экономике в целях снижения «углеродного следа».



**Рисунок 6. Межгодовые изменения среднегодовой температуры воздуха в Москве 1881 – 2022 г. по данным РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева и МГУ им М.В. Ломоносова**

Вопросы оптимизации деятельности энергетической инфраструктуры становятся чрезвычайно актуальными в условиях цифровой трансформации городского хозяйства. В 2021 году в Москве установлено около 200 зарядных станций для электромобилей, в 2023 году будет установлено еще 600. Летом 2023 года осуществлен запуск маршрутов речного круглогодичного электротранспорта, в результате чего в Москве прогнозируется дополнительная потребность в электроэнергии.

Анализ основных производственных и экологических показателей объектов тепловой энергетики Москвы за 2020 год выявил значительные различия не только в эффективности использования мощности объектов, но и в уровне углеродной и азотной нагрузки. Наибольший вклад в «углеродный след» Москвы от стационарных источников вносят объекты тепловой энергетики. Так, наибольший углеродный след ( $GHG_{fp} - 2,027$  г.  $CO_2e/kВтч$ ) и индекс углеродной нагрузки ( $I_{LC} - 7,094$ , группа «высокой» углеродной нагрузки) имеет ТЭС «Терешково». Наибольший азотный след имеет ТЭС-1 ( $NO_{fp} - 1,919$  г.  $NO_2/kВтч$ ), при этом ТЭЦ-21 имеет наибольший индекс азотной нагрузки ( $I_{LN} - 353,1$ , группа «очень высокой» азотной нагрузки). Кроме того, выявлены высокие значения показателей выбросов антропогенного углерода на единицу площади для ТЭС «Терешково» и ТЭЦ-26, а также очень высокие значения показателей выбросов антропогенного азота на единицу площади для всех Московских ТЭЦ (табл. 3).

Результаты оценки ассимиляционного потенциала наземных экосистем ООПТ к поглощению выбросов антропогенного углерода и азота показали, что территория города Москвы относится к группе «средней» углеродной нагрузки ( $I_{LC} - 0,021$ ) и группе «высокой» азотной нагрузки ( $I_{LN} - 10,67$ ). Показатель выбросов антропогенного углерода и азота на гектар составляет 68,7 кг/га и 453,4 кг/га соответственно, что существенно превышает допустимые значения, в частности, по азоту – 30 кг/га (табл. 4). Для компенсации избытков поступающего

антропогенного азота потребуется дополнительно не менее 297 777 га наземных экосистем, что даже превышает площадь всей территории Москвы (256 150 га).

**Таблица 3. Экологическая оценка углеродной и азотной нагрузки Московских ТЭЦ**

Название	Мощность, МВт	$GHG_{fp}$ , г. $CO_2e/кВтч$	$I_{LC}$	$C-CO_2/га$	$NO_{fp}$ , г. $NO_2/кВтч$	$I_{LN}$	$N-NO_2/га$
ГЭС-1	76	0,084	0,043	142,0	1,919	81,7	3 617
ТЭЦ-8	580	0,018	0,071	235,0	0,455	148,7	6 588
ТЭЦ-9	274	0,023	0,054	179,4	0,322	62,2	2 755
ТЭЦ-11	330	0,018	0,051	169,7	0,345	83,9	3 718
ТЭЦ-12	611,6	0,025	0,130	430,1	0,546	235,2	10 419
ТЭЦ-16	651	0,021	0,131	433,1	0,201	104,3	4 620
ТЭЦ-20	1 107	0,022	0,164	542,4	0,398	244,2	10 817
ТЭЦ-21	1 765	0,038	0,266	881,5	0,605	353,1	15 641
ТЭЦ-22	1 070	0,002	0,003	8,5	1,037	95,0	4 207
ТЭЦ-23	1 420	0,003	0,022	73,6	0,403	259,8	11 509
ТЭЦ-25	1 370	0,017	0,105	347,1	0,441	232,9	10 317
ТЭЦ-26	1 840	0,096	0,840	2 783,8	0,468	341,2	15 113
ТЭЦ-27	1 060	0,000	0,000	0,5	0,149	36,4	1 614
Международная	236	0,047	0,168	556,8	0,352	106,3	4 708
Терешково	170	2,027	7,094	23 504,3	0,209	61,3	2 713
Коломенское	136	0,123	0,148	489,6	0,563	56,5	2 504

Выявленные взаимосвязи между экологическими и производственными показателями (Артамонов и др., 2020) позволяют прогнозировать на среднесрочную перспективу уровень выбросов  $NO_2$  и азотного следа для определения мероприятий по оптимизации антропогенной нагрузки в условиях г. Москвы. Высокий коэффициент детерминации ( $R^2$ ) в выведенной формуле множественной регрессии (6.1) позволяют вести мониторинг расчетных показателей с достаточно высокой точностью. Формула может быть актуализирована по мере накопления ежегодно обновляемых данных. Отмеченные закономерности наиболее очевидно демонстрируются в случае с антропогенным азотом.

**Таблица 4. Ассимиляционный потенциал московских ООПТ по стоку антропогенного углерода и азота от выбросов ТЭЦ**

Показатель	Углерод (C)	Азот (N)
Запасы фитомассы, $кг/м^2$ ( $B_o$ )	65,48	65,48
Запасы гумуса в почве $кг/м^2$ ( $H_o$ )	6,80	6,80
Запасы органического углерода и азота в фитомассе ( $C_B$ ) и ( $N_B$ ), кг	6 450 758 926	82 702 038
Запасы органического углерода и азота в почвенном покрове ( $C_S$ ) и ( $N_S$ ), кг	777 200 202,9	9 964 105
Усредненный показатель годичного обновления углерода и азота в фитомассе ( $C_{Ba}$ ) и ( $N_{Ba}$ ), $кг/год$	64 507 589,3	827 020,4
Усредненный показатель годичного обновления углерода и азота в почвенном покрове ( $C_{Sa}$ ) и ( $N_{Sa}$ ), $кг/год$	777 200,2	9 964,1
Суммарный показатель годичного обновления органического углерода и азота в наземных экосистемах в зоне непосредственного воздействия ТЭС ( $C_{Ta}$ ) и ( $N_{Ta}$ ), $кг/год$	65 284 789,5	836 984,5
Выбросы антропогенного углерода и азота от выбросов ТЭС ( $C-CO_2$ ) и ( $N-NO_2$ ), $кг/год$	1 354 966,4	8 933 966,5
Индекс углеродной и азотной нагрузки ( $I_{LC}$ ) и ( $I_{LN}$ )	0,021	10,67
Выбросы антропогенного углерода ( $C-CO_2$ ) и азота ( $N-NO_2$ ) от выбросов ТЭС на единицу площади ООПТ Москвы, $кг/га$	68,7	453,4

Показатель выбросов NO<sub>2</sub> в атмосферу от ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» определяется по расчетной формуле (6.1), результаты расчета в сравнении с фактическими выбросами за 2020 год представлены на рисунке 7.

$$E_{NO_2} = -396,45 - 0,643 * E_{ген} + 0,005 * H_{ген} + 3,092 * Gas \quad R^2 = 0,88 \quad (6.1)$$

Где,

$E_{NO_2}$  – Выбросы NO<sub>2</sub>, тонн;

$E_{ген}$  – производство электроэнергии, млн. кВтч;

$H_{ген}$  – производство тепловой энергии тыс. Гкал; Gas – расход газа, млн. м<sup>3</sup>.

Общие выбросы NO<sub>2</sub> с учетом областных ТЭЦ-22 и ТЭЦ-27 за 2020 г. составили 28 тыс. тонн. К 2035 году, согласно прогнозным данным, произойдет увеличение выбросов NO<sub>2</sub> на 28 %, (36 тыс. тонн), что на 4 тыс. тонн меньше официального прогноза ПАО «Мосэнерго» – 40 тыс. тонн. Наиболее значительное увеличение выбросов NO<sub>2</sub> прогнозируется на ТЭЦ- 8, ТЭЦ-23 и ТЭЦ-25.

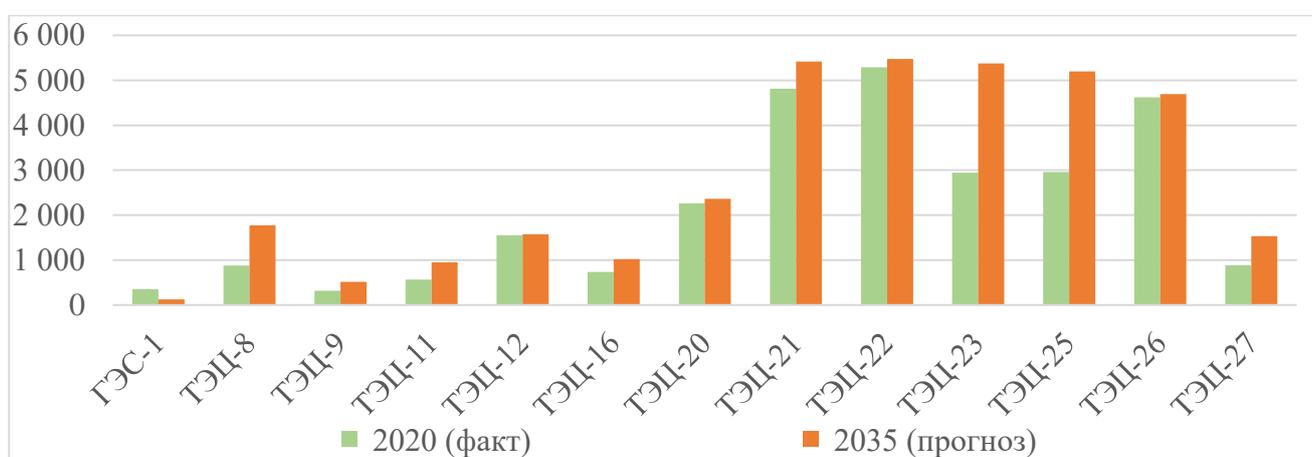


Рисунок 7. Фактические выбросы NO<sub>2</sub> на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» в 2020 г. и прогнозные значения на 2035 г., рассчитанные по формуле (6.1), тонн

На основе прогнозных данных выбросов NO<sub>2</sub> произведен расчет азотного следа и индекса азотной нагрузки и осуществлено сравнение полученных значений с фактическими данными за 2020 год (табл. 5).

Таблица 5. Экологическая оценка углеродного и азотного следа ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

ТЭЦ	NO <sub>fp</sub> , г. NO <sub>2</sub> /кВтч 2020	I <sub>LN</sub> 2020	NO <sub>fp</sub> , г. NO <sub>2</sub> /кВтч 2035	I <sub>LN</sub> 2035	NO <sub>fp</sub> , г. NO <sub>2</sub> /кВтч (+/-)	I <sub>LN</sub> (+/-)
ТЭС-1	1,919	81,7	0,637	29,6	-1,282	-52,1
ТЭЦ-8	0,455	148,7	0,712	301,0	<b>0,257</b>	<b>152,3</b>
ТЭЦ-9	0,322	62,2	0,461	100,8	<b>0,139</b>	<b>38,6</b>
ТЭЦ-11	0,345	83,9	0,443	140,6	<b>0,098</b>	<b>56,7</b>
ТЭЦ-12	0,546	235,2	0,419	238,4	-0,127	<b>3,2</b>
ТЭЦ-16	0,201	104,3	0,208	145,1	<b>0,007</b>	<b>40,8</b>
ТЭЦ-20	0,398	244,2	0,355	254,8	-0,043	<b>10,6</b>
ТЭЦ-21	0,605	353,1	0,540	397,5	-0,065	<b>44,4</b>
ТЭЦ-22	1,037	95,0	0,806	98,2	-0,231	<b>3,2</b>
ТЭЦ-23	0,403	259,8	0,599	473,9	<b>0,196</b>	<b>214,1</b>
ТЭЦ-25	0,441	232,9	0,576	409,4	<b>0,135</b>	<b>176,5</b>
ТЭЦ-26	0,468	341,2	0,413	346,5	-0,055	<b>5,3</b>
ТЭЦ-27	0,149	36,4	0,243	62,7	<b>0,094</b>	<b>26,3</b>

Московские ТЭЦ располагаются в урбанизированных экосистемах, большая часть из которых покрыта асфальтированными и другими водонепроницаемыми покрытиями, характеризующимися низким ассимиляционным потенциалом. Лесные площади, позволяющие компенсировать воздействие антропогенных выбросов, расположены на значительных расстояниях. Парки и зеленые зоны Москвы, имеющие ограниченные ассимиляционные способности ввиду их недостаточных площадей, не позволяют полностью скомпенсировать повышенное поступление антропогенного азота от ТЭЦ. Данная ситуация вызывает серьезную обеспокоенность в связи с тем, что в настоящее время в Москве прогнозируется рост энергопотребления, связанный с мероприятиями по цифровой трансформации городского хозяйства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная экологическая оценка углеродного и азотного следа объектов тепловой энергетики в условиях РФ с анализом ассимиляционного потенциала наземных экосистем к поглощению антропогенного углерода и азота показала значительную пространственную дифференциацию и локальное обострение экологических проблем, связанных повышенной антропогенной нагрузкой на отдельные наземные экосистемы от выбросов антропогенного углерода и азота. Результаты анализа исследуемых ТЭС мощностью более 50 МВт в соответствии с данными информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» (ИТС 38-2017) продемонстрировали их соответствие российским «зеленым стандартам» в энергетике по выбросам парниковых газов. При увеличении показателя КИУМ для угольных ТЭС большой мощности (более 1000 МВт) необходима технико-технологическая экспертиза соответствия их деятельности «зеленым стандартам».

В результате исследования сформулированы следующие выводы.

1. В России с 1990 года отмечается общий тренд на снижение выбросов  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_2$  при росте производства электроэнергии. Имеются перспективы реализации сценариев стратегии низкоуглеродного развития России и постепенного перехода субъектов РФ к углеродной нейтральности территорий, а также обеспечению сохранения биоразнообразия наземных экосистем в соответствии с Конвенцией о биологическом разнообразии 1992 года.

2. Результаты расчета углеродного и азотного следа ТЭС показали четкую дифференциацию объектов, относящихся к разным технологическим группам. Повышенный уровень углеродного и азотного следа имеют, как правило, угольные ТЭС с низкими показателями коэффициента использования установленной мощности (до 25 %). С учетом этого можно ставить вопрос об их экологической целесообразности или возможной модернизации технологического оборудования.

3. Предложенные и апробированные в работе индексы углеродной ( $I_{LC}$ ) и азотной ( $I_{LN}$ ) нагрузки позволили дифференцировать уровень антропогенной нагрузки ТЭС на наземные экосистемы, что в свою очередь позволяет оценить ассимиляционный потенциал наземных экосистем в зоне непосредственного

воздействия ТЭС. Для отдельных наземных экосистем ассимиляционный потенциал превышен до 20 раз по углероду ( $I_{LC} = 20,5$ ) и до 2200 раз по азоту ( $I_{LN} = 2195,1$ ). В целом, азотная нагрузка на наземные экосистемы имеет более значительные показатели в сравнении с углеродной. Наиболее экологически безопасными объектами энергетики являются газовые ТЭЦ, индекс азотной нагрузки которых менее 0,01. Необходимо учитывать наличие большого количества лесных экосистем в непосредственной близости от многих ТЭС, что позволяет обеспечить повышенную буферность наземных экосистем в зоне их воздействия.

4. Для достижения целевых значений стратегии низкоуглеродного развития представляется целесообразным повышение значений коэффициента используемой установленной мощности (КИУМ). Среди 356 исследуемых объектов средний показатель КИУМ составляет 45,8 %, при увеличении КИУМ до 70 %, производство электроэнергии на действующих ТЭС составит более 1000 млрд. кВтч, что позволит покрыть более 90 % потребности в электроэнергии. К 2035 году в связи с планируемым вводом в эксплуатацию новых ТЭС суммарной мощностью 84,6 ГВт прогнозируется увеличение антропогенной нагрузки на экосистемы, более предпочтительным остается оптимизация режимов работы действующих ТЭС с учетом ассимиляционных способностей наземных экосистем.

5. На территории Москвы к 2035 году прогнозируется увеличение азотного следа и индекса азотной нагрузки для большинства рассматриваемых ТЭЦ ПАО «Мосэнерго». Наибольший азотный след может достигать до 0,806 г.  $\text{NO}_2/\text{кВтч}$ , наибольший индекс азотной нагрузки может достигать до 473,9. Электробаланс Москвы начиная с 2012 года является дефицитным, при этом в настоящее время в Москве осуществляется комплекс мер по цифровой трансформации городского хозяйства, которая требует дополнительное энергоснабжение, поэтому возникает вопрос о целесообразности производства электроэнергии на территории города.

6. В результате экологической оценки соответствия исследуемых ТЭС «зеленым стандартам» в энергетике по выбросам парниковых газов установлено, что большинство исследуемых электростанций соответствует критериям «адаптационным проектов», при этом критериям «зеленых проектов» не соответствует Томская ТЭЦ-1, которая работает в режиме котельной и осуществляет в основном теплоснабжение ( $GHG_{fp} - 134,7$  г.  $\text{CO}_2\text{e}/\text{кВтч}$ , при целевом значении – менее 100 г.  $\text{CO}_2\text{e}/\text{кВтч}$ ).

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **Журналы из списка, рекомендованных ВАК:**

1. Артамонов Г.Е. Экологические аспекты энергетической стратегии Российской Федерации / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2011 г. № 4 С. 106 – 112.

2. Артамонов Г.Е. Природные ресурсы и экосистемы для объектов ТЭК / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Вестник Российского Университета Дружбы Народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности, М.: РУДН. 2013 г. № 4. – С. 107-117.

3. Артамонов Г.Е. Агрэкосистемы для объектов тепловой энергетики / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 8. С. 26 – 39.
4. Артамонов Г.Е. Моделирование воздействия объектов тепловой энергетики города Москвы на экосистемы / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Экология урбанизированных территорий / Изд. дом "Камертон". – 2019. – № 2. С. 62 – 68.
5. Артамонов Г.Е. Экологическая оценка объектов тепловой энергетики по влиянию на экологические услуги депонирования углерода локальными наземными экосистемами / Г.Е. Артамонов, И.И. Васенев, В.А. Гутников // Проблемы региональной экологии: общественно-научный журнал / учредитель: Изд. дом "Камертон". – 2019. – № 6. С. 125 – 133.
6. Артамонов Г.Е. Экологическая оценка по критериям «Зеленых проектов» для объектов тепловой энергетики Российской Федерации / Г.Е. Артамонов, И.И. Васенев, В.А. Гутников // Проблемы региональной экологии / Изд. дом "Камертон". – 2022 – № 1. С. 74 – 83.
7. Артамонов Г.Е. Экологическая оценка азотного следа объектов тепловой энергетики в российской федерации / Г.Е. Артамонов, И.И. Васенев, В.А. Гутников // Проблемы региональной экологии / Изд. дом "Камертон". – 2022 – № 4. С. 5 – 16.

### **Публикации, цитируемые в базе Scopus:**

8. Artamonov G.E. Vasenev I.I. Erofeeva V.V. Gutnikov V.A. Environmental Assessment of Thermal Energy Facilities Impact on Ecosystem Services for the Production of Oxygen in Urban Settlements. *Advanced Technologies for Sustainable Development of Urban Green Infrastructure*. P. 272 – 282.
9. Artamonov G.E. Gutnikov V.A. Erofeeva V.V. Yablochnikov S.L. Modeling the environmental situation in a smart city. 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 – Proceedings, 2020. – 9261566. – [Electronic resource]. – URL: <https://repository.rudn.ru/en/records/article/record/71763>

### **Статьи в сборниках:**

10. Артамонов Г.Е. Экологическая безопасность деятельности топливно-энергетического комплекса / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Актуальные проблемы современной и международной экологической безопасности «ООН и современные проблемы международной безопасности в условиях глобализации»: материалы ежегодной научно-практической конференции памяти Дага Хаммаршельда: в 2 ч. Москва, 2011 г. – М.: РУДН, 2012. – С. 57 – 60.
11. Артамонов Г.Е. Динамика развития объектов энергетики экономически развитых стран / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. науч. тр. / отв. ред. Н.А. Черных. – Вып. 15. – М.: РУДН, 2013. – С. 480 – 484.
12. Артамонов Г.Е. Использование экосистем электростанциями Москвы / Г.Е. Артамонов // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. науч. тр. международной научно-практической конференции: в 2 ч. – Москва: РУДН. 2015. – Ч.1 С. 299 – 302.
13. Артамонов Г.Е. Экологические принципы оптимизации воздействия объектов энергетики на экосистемы // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии 2018 № 2 (22) (апрель-июнь). С. 16 – 27.
14. Артамонов Г.Е. Экологическая оценка воздействия объектов тепловой энергетики на ландшафты / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Материалы международной научно-практической конференции «Пятые ландшафтно-экологические чтения, посвященные Г.Е. Гришанкову» Севастополь, 12 – 16 сентября 2022 г. С. 267 – 272.
15. Артамонов Г.Е. Ландшафтно-экологический подход при анализе объектов тепловой энергетики / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // XIV международная ландшафтная конференция «теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии». VII Мильковские чтения, посвященные 105-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ, д.г.н., проф. Ф.Н. Милькова 17-21.05.2023, г. Воронеж. С. 182 – 184.