

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Гутников Владимир Анатольевич

Научный консультант:
доктор биологических наук
Васенёв Иван Иванович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ: ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО И АЗОТНОГО СЛЕДА В ЭНЕРГЕТИКЕ	13
1.1. Глобальное изменение климата	13
1.2. Парниковые газы как фактор глобального изменения климата	17
1.3. Воздействие ТЭС на изменение климата и состояние наземных экосистем	21
1.4. Регулирование выбросов парниковых газов	27
1.5. Экологическая оценка выбросов парниковых газов в энергетике	33
1.6. Методология оценки углеродного следа объектов тепловой энергетики	39
1.7. Методологии оценки азотного следа объектов тепловой энергетики	45
1.8. Энергетический комплекс Москвы	50
1.9. Актуальные задачи экологической оценки углеродного и азотного следа в энергетике	56
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	59
2.1. Характеристика региона исследования.....	59
2.2. Объекты исследования	64
2.3. Методы исследования.....	69
ГЛАВА 3. РЕГИОНАЛЬНО-ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ	75
3.1. Типизация исследуемых объектов тепловой энергетики.....	75
3.2. Государственные районные электростанции (ГРЭС).....	76
3.3. Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ)	78
3.4. Промышленные ТЭС	80
3.5. Дизельные электростанций (ДЭС)	82
3.6. Кластерный анализ исследуемых объектов тепловой энергетики	82
ГЛАВА 4. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ	87
4.1. Динамика выбросов CO ₂ в секторе «Энергетика».....	87
4.2. Расчет показателя углеродного следа от деятельности ТЭС	89
4.3. Оценка растительного и почвенного пулов углерода в наземных экосистемах зоны воздействия объектов тепловой энергетики.....	90
4.4. Экологическая оценка углеродной нагрузки ТЭС	92
4.5. Соотношение выбросов антропогенного углерода и суммарного показателя годичного обновления органического углерода.....	95
4.6. Взаимосвязи производственных и экологических показателей ТЭС	98
4.7. Типизация объектов тепловой энергетики по уровню углеродного следа.....	101
4.8. Экологическая оценка углеродного следа объектов тепловой энергетики.....	103
ГЛАВА 5. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АЗОТНОГО СЛЕДА ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ	105

5.1. Динамика выбросов NO _x от стационарных источников	105
5.2. Расчет показателя азотного следа от деятельности ТЭС	107
5.3. Оценка растительного и почвенного пулов азота в наземных экосистемах зоны воздействия объектов тепловой энергетики.....	108
5.4. Экологическая оценка азотной нагрузки ТЭС	110
5.5. Соотношение выбросов антропогенного азота и суммарного показателя годовичного обновления органического азота	113
5.6. Взаимосвязи производственных и экологических показателей ТЭС	115
5.7. Типизация объектов тепловой энергетики по уровню азотного следа	118
5.8. Экологическая оценка азотного следа объектов тепловой энергетики	120
ГЛАВА 6. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО И АЗОТНОГО СЛЕДА ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ МОСКВЫ	122
6.1. Региональные особенности климата Москвы	122
6.2. Экологический анализ электробаланса Москвы	123
6.3. Экологическая оценка выбросов ТЭЦ Москвы.....	127
6.4. Взаимосвязи производственных и экологических показателей ТЭЦ	132
6.5. Типизация ТЭЦ Москвы по производственным и экологическим показателям	134
6.6. Оценка ассимиляционного потенциала ООПТ Москвы по стоку антропогенного углерода и азота от выбросов ТЭЦ.....	136
6.7. Экологическая оценка прогнозируемых значений выбросов ТЭЦ ПАО «Мосэнерго».....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	145

ВВЕДЕНИЕ

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 (Доклад ВМО: предварительное состояние глобального климата, 2022; Данилов-Данильян, 2021; Романовская и др., 2022).

Самыми крупными антропогенными источниками эмиссии парниковых газов в мире являются генерирующие объекты тепловой энергетики (ТЭС), использующие уголь в качестве основного вида топлива (Минкина, 2022; Иващенко, Нежевляк, 2021; Филиппова, Кульчурина, 2019; Куценко, 2013). В Российской Федерации выбросы парниковых газов и других загрязняющих веществ от производственной деятельности ТЭС оказывают существенное воздействие на наземные экосистемы (Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в РФ за 2021; Мищенко и др., 2021; Неведров, 2022). По данным наблюдений сети мониторинга Росгидромета и годовым отчетам Минприроды России в крупных городах и промышленных районах наблюдается тенденция к превышению ПДК по содержанию в атмосфере загрязняющих веществ, доля ТЭС в региональных показателях загрязнения атмосферы остается значительной (Госдоклад о состоянии и об охране окружающей среды РФ в 2021 году; Безуглова, 2020; Сергеева, 2023). Основную часть вредных выбросов в атмосферу вследствие сжигания углеводородного топлива составляют оксиды углерода и азота (СО, СО₂, NO и NO₂).

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

наземного депонирования антропогенного углерода (C) и азота (N) и способны накапливать их в высоких концентрациях.

Технологический переход мировой энергетики от генерации на основе углеводородного сырья к безуглеродным энергоресурсам и энергоресурсам с низким уровнем выбросов парниковых газов, так называемый 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, получившего международное значение, 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, что также определяет общемировой тренд на снижение углеродного следа и достижения углеродной нейтральности территории.

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 систематическом анализе и учете экосистемного разнообразия территории страны и достижения Россией к 2060 году углеродной нейтральности территории, предусмотренной новой стратегией низкоуглеродного развития, утверждённой Распоряжением Правительства от 29.10.2021 № 3052-р. 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 на период до 2035 года).

Степень разработанности. В связи с повышенным вниманием научного сообщества к проблеме глобального изменения климата, в последнее десятилетие значительное развитие получили исследования по анализу влияния выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ на экосистемы, а также различным экологическим оценкам ассимиляционных способностей экосистем к поглощению антропогенных выбросов (доклад ВМО: Единство в науке, 2022).

Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) в целях получения объективных научных данных, касающихся изменения климата, его последствий и рисков, а также для предложения стратегий в области адаптации и смягчения воздействий изменения климата была создана Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК). За годы работы ВМО, ЮНЕП и МГЭИК подготовлены фундаментальные труды о мерах по борьбе с изменением климата, климатической экономике и по вопросам, касающимся последствий изменения климата и соответствующих решений (IPCC report: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, 2021; IPCC report: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022). Произведена первичная классификация основных видов парниковых газов, оказывающих наибольшее негативное влияние (Бюллетень по парниковым газам ВМО, 2022). Систематизирована информация по выбросам парниковых газов от различных отраслей экономики и их абсорбции разными видами экосистем (наземные, водные, лесные и др.) в динамике начиная с 1990 года, который принят за базовый (UNEP Emissions Gap Report, 2022; доклад ВМО о состоянии услуг в области климата: энергетика, 2022).

Российской Федерацией в соответствии с обязательствами по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) и Киотскому протоколу к Рамочной Конвенции ООН об изменении климата (КП) ежегодно публикуются

обобщающие национальные доклады об оценке выбросов и абсорбции парниковых газов (Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2020 гг., 2022) подготавливаемые под организационным руководством Росгидромета и методическим руководством Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ФГБУ «ИГКЭ»).

Накопленный фактический материал позволяет переходить к функциональной и сравнительной экологической оценке углеродного и азотного следа объектов тепловой энергетики и к оценке ассимиляционного потенциала наземных экосистем, расположенных в зонах непосредственного воздействия ТЭС.

Целью исследования 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. Среди 356 исследуемых ТЭС средний показатель коэффициента использования установленной мощности (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 страны в электроэнергии.

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. Углеродная нагрузка оценивается как средняя ($I_{LC} - 0,021$), азотная нагрузка оценивается как высокая ($I_{LN} - 10,67$). Усредненный показатель выбросов антропогенного углерода и азота составляет 68,7 кг/га и 453,4 кг/га соответственно.

Осуществлена оценка соответствия деятельности ТЭС «зеленым стандартам» в энергетике по выбросам парниковых газов.

Практическая значимость. Полученные результаты диссертационного исследования 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 к 2060 году Российской Федерацией углеродной нейтральности территории.

Основные положения и материалы исследования могут быть использованы для разработки документов стратегического планирования (Федеральный закон «О стратегическом планировании в Российской Федерации», 2014) и обоснования рационального выбора наилучших доступных мест строительства новых ТЭС, которые подлежат внесению в генеральную схему размещения объектов энергетики (Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 года), а также при подготовке проектных и учебных материалов в высших учебных заведениях.

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).

Рассмотренный в работе метод прогнозирования экологически сбалансированных выбросов NO_2 на основе оценки ассимиляционного потенциала

наземных экосистем в условиях г. Москвы имеет практический интерес для региональных генерирующих компаний.

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_2 и NO_2 на наземные экосистемы. При решении частных задач исследования применены методы статистического анализа и классификации исследуемых объектов.

Основные положения диссертации, 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 приведенных 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 ежегодной Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2011), Научной конференции с Международным участием ежегодные научные чтения памяти Дага Хаммаршельда «ООН и современные проблемы международной безопасности в условиях глобализации» (Москва, 2011), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2012), Международной молодежной научно-практической конференции с элементами научных школ «Фундаментальные науки и пути становления и развития новой экономики России» (Москва, 2012), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2013), Международной научно-практической конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2014), III международной научно-практической конференции «Современная биология: актуальные вопросы» (Санкт-Петербург, 2014), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2015), Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию А.В. Леонтовича (Москва, 2019), International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 – Proceedings (Вена, 2020), Международной научно-практической конференции Пятые ландшафтно-экологические чтения, посвященные Г.Е. Гришанкову «Природа и общество: интеграционные процессы» (Севастополь, 2022), XIV международной ландшафтной конференции «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 (Воронеж, 2023).

Публикации. 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 Васенёву 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 В ЭНЕРГЕТИКЕ

1.1. Глобальное изменение климата

Климатическая система Земли включает в себя атмосферу, гидросферу литосферу, криосферу и биосферу, которые обмениваются потоками энергии и рассматриваются как единое целое. Климат в различных природных поясах Земли определяется балансом между поступающей солнечной энергией и энергией, уходящей из атмосферы в космос. Существенное влияние на этот баланс оказывает наличие в атмосфере парниковых газов, имеющих антропогенное происхождение и усиливающих парниковый эффект, который представляет собой процесс поглощения в атмосфере Земли теплового излучения, испускаемого сушей и океаном, в результате чего количество уходящего в космос излучения оказывается меньшим, чем оно было бы в отсутствие поглотителей в атмосфере (Биоклиматический потенциал России: методы мониторинга в условиях изменяющегося климата, 2007). В связи с этим в отдельных регионах Земли в воздухе накапливается избыточное количество парниковых газов, что приводит к различным последствиям. Например, эффект увеличения концентрации парниковых газов в бореальной зоне может привести к повышению чистой первичной продуктивности растительного покрова, однако климатические изменения в аридной зоне могут привести к снижению годовой продукции экосистем, что также оказывает влияние на биоразнообразие в локальных экосистемах (Биоклиматический потенциал России: меры адаптации в условиях изменяющегося климата, 2008). Некоторые глобальные климатические модели позволяют предположить вероятность ускорения динамики наблюдаемых изменений климата. В частности, чистое связывание углерода наземными экосистемами в первой половине XXI столетия может повышаться, затем стабилизируется и начнет снижаться (Володин и др., 2016).

Парниковые газы образуются как в результате естественных причин, так и в результате антропогенной деятельности. Одним из определяющих факторов существенного увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере и

усиления парникового эффекта является производственная деятельность генерирующих объектов тепловой энергетики. Среди всего многообразия воздействия объектов тепловой энергетики на компоненты природной среды особое внимание следует уделить выбросам загрязняющих веществ в атмосферу, образующимся при сжигании углеводородного топлива, в результате деятельности по производству электроэнергии (Gustafson, 2021; Hoegh-Guldberg, 2018). Ускоряющиеся темпы изменения климата в результате растущих выбросов парниковых газов от объектов тепловой энергетики являются главной экологической проблемой современного развития теплоэнергетики (Тайлаков и др., 2021).

По оценке МГЭИК, начиная с 1970-х годов в мире наблюдается глобальное изменение климатических условий, которое проявляется в росте температуры и связано с увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере. По состоянию на 2020 год глобальная средняя приземная температура воздуха превысила доиндустриальный уровень 1850 – 1900 годов на 1,1 °С (Панина, 2021).

Межгодовая динамика аномалии среднегодовой приземной температуры воздуха и поверхности моря Северного полушария с 1850 – 2023 имеет тренд на увеличение, характеризуется значительными колебаниями и цикличностью (рис. 1.1.1). по отношению к климатической норме.

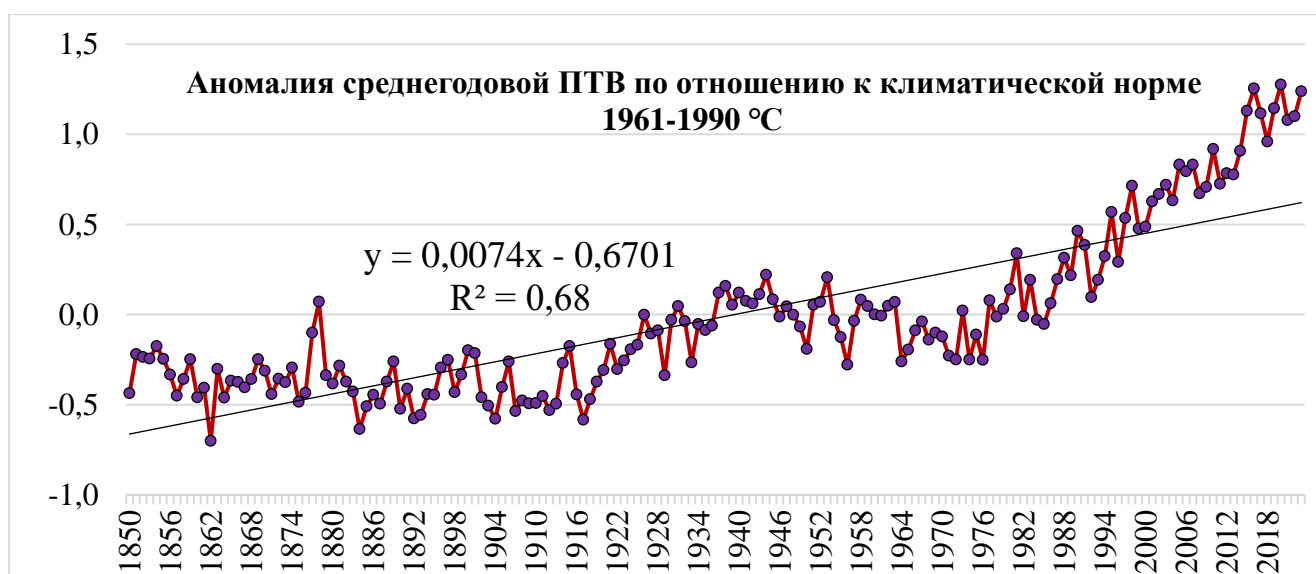


Рисунок 1.1.1. Межгодовые изменения аномалии среднегодовой приземной температуры воздуха и поверхности моря Северного полушария с 1850 – 2023 г. (по данным CMIP6: <https://wcrp-cmip.org/cmip-phase-6-cmip6/>)

Многолетние климатические изменения оказывают значительное влияние на состояние экосистем, общества и экономики, индикаторы климатической изменчивости включают индексы, отражающие состояние атмосферы, океана и биосферы в глобальном масштабе. Они используются для мониторинга влияния этих изменений на окружающую природную среду в целях организации рационального использования природных ресурсов и эффективного развития хозяйственной деятельности (Шерстюков, 2007). Согласно рекомендациям ВМО для характеристики климатической изменчивости оптимальным является 30-летний период осреднения (1961 – 1990 г., 1991 – 2020 г.) данных метеорологических наблюдений.

Динамика общего солнечного излучения (TSI, показатель солнечной энергии на всех длинах волн на единицу площади, падающей на верхние слои атмосферы Земли) в мире с 1880 – 2022 годов (рис. 1.1.2) имеет незначительный тренд на увеличение, который характеризуется значительными колебаниями и периодической цикличностью (Coddington et al., 2019).

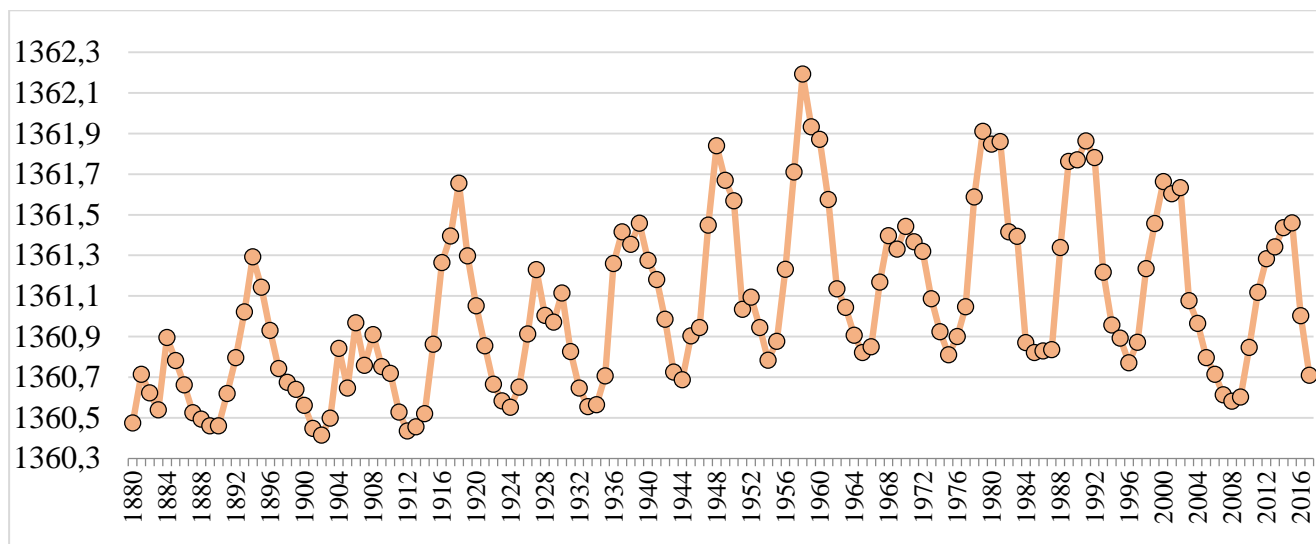


Рисунок 1.1.2. Реконструкция месячных данных общего солнечного излучения (TSI) модели NRL2 версии 1.9.10 (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data>)

Изменения климата многообразны и проявляются, в частности, в изменении частоты и интенсивности климатических аномалий и экстремальных погодных явлений. Одним из важнейших индикаторов изменения климата также является глобальный индекс температуры, который представляет собой осредненные

аномалии температуры у поверхности земли, приземной температуры воздуха над континентами и температуры поверхности в регионах мирового океана (Физические основы теории климата и его моделирования, 1977).

Наблюдаемые в мире и ожидаемые в будущем изменения климата также обуславливают многочисленные последствия для природных экосистем и населения России. На территории отдельных регионов Российской Федерации потепление климата происходит выше среднемировых темпов, что обусловлено особенностями их географического положения и природно-климатических условий. Среднегодовые температуры показывают рост во многих субъектах РФ, наибольшая скорость роста среднегодовой температуры отмечается на побережье Северного Ледовитого океана (Кононова, 2015).

Площадь территории и многообразие природно-климатических условий изменения климата создает для Российской Федерации новые возможности, в том числе: сокращение продолжительности отопительного периода, рост продуктивности сельскохозяйственных культур и ассимиляционной способности экосистем. Увеличивается вегетационный период, повышается первичная продуктивность экосистем. Наблюдается продвижение древесной растительности в горные тундры и продвижение темнохвойной тайги на территории, занимаемые лиственничниками на равнине. Увеличивается суммарный годовой сток рек, растет его межгодовая изменчивость. Деградирует оледенение арктических островов и горное оледенение. На равнине область протаявшей с поверхности многолетней мерзлоты увеличивается, а температура многолетнемерзлых пород повышается. Увеличиваются интенсивность засух и охват ими территории (Алексеев и др., 2014).

Проблемы глобального изменения климата проявляются на глобальном, региональном, субрегиональном и национальном уровнях. Изменение климата является одной из важнейших международных проблем XXI века, которая выходит за рамки научной проблематики и представляет собой комплексный междисциплинарный вопрос, охватывающий экологические, экономические и

социальные аспекты устойчивого развития Российской Федерации (Климатическая доктрина Российской Федерации, 2009).

В Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года последствия изменения климата и его влияние на благополучие населения и устойчивое развитие, а также состояние животного и растительного мира признаны одними из глобальных вызовов экологической безопасности.

Указанные факторы определяют необходимость учета изменений климата в качестве одного из ключевых долговременных факторов безопасности Российской Федерации и выдвигают проблему глобального изменения климата в ее национальном и международном измерениях в число приоритетов государственной политики.

1.2. Парниковые газы как фактор глобального изменения климата

Выбросы парниковых газов и других загрязняющих веществ оказывают существенное влияние на изменение климата, динамику углеродного и азотного баланса в наземных экосистемах. Основными парниковыми газами являются:

– диоксид углерода (CO_2), образующийся в процессе сжигания угля или углеводородных соединений, при ферментации жидкостей, а также как продукт дыхания людей и животных (Алехнович, 2022);

– метан (CH_4), образующийся при анаэробном разложении органических веществ. Основными источниками поступления метана в атмосферу являются болота и тропические леса;

– закись азота (N_2O), образующаяся как при ферментативном, так и неферментативном восстановлении из окиси азота (II);

– гидрофторуглероды (ГФУ);

– перфторуглероды (ПФУ), образующиеся при получении фтора в результате электролиза раствора фторида;

– гексафториды серы (SF_6), образующейся при разложении сложных фторидов серы;

– трифторид азота (NF_3), получаемый путём электролиза раствора фторида аммония во фтороводороде.

Также большую опасность представляют газы с косвенным парниковым эффектом. Например, оксиды азота (NO_x) являются токсичными веществами и представляют серьёзную опасность для наземных экосистем, так как способны вызывать кислотные дожди, кроме того, они являются одной из причин образования фотохимического смога, а также вызывают раздражение слизистых оболочек организма человека. Основным источником антропогенных выбросов оксидов азота являются угольные электростанции, в природной среде NO_x могут образоваться вследствие молний и лесных пожаров (Рыжий, 2015). Среди оксидов азота особо токсичен NO_2 , который согласно ГОСТ 12.1.007-76 относится к III классу опасности и является сильнодействующим ядовитым веществом, а также мощным окислителем. В небольших концентрациях NO_2 приводит к раздражению дыхательных путей, в больших концентрациях может вызывать отёк лёгких, известен так называемым «лисьим хвостом» – выбросами в атмосферу оранжево-бурого цвета на промышленных предприятиях (Вершинин и др., 2020).

Угарный газ (CO) по степени воздействия на организм является малоопасным веществом IV-го класса опасности, однако вызывает отравление с поражением жизненно важных органов, с последующим летальным исходом, не имеет запаха. Токсическое действие угарного газа обусловлено образованием карбоксигемоглобина, который препятствует транспортировке кровью кислорода, что приводит к развитию гипоксии.

Диоксид серы (SO_2) относится к III классу опасности («умеренно-опасное химическое вещество»), в высоких дозах очень токсичен, вызывает насморк, кашель, охриплость, сильное першение в горле. При вдыхании сернистого газа более высокой концентрации возникает удушье, возможен острый отёк лёгких.

Все вышеперечисленные газы указаны в приложении «А» Киотского протокола. Большинство из указанных веществ входят в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного

регулирования в области охраны окружающей среды, утверждённый Распоряжением Правительства РФ от 08.07.2015 № 1316-р.

Международная организация по стандартизации выпускает документы, которые поддерживают преобразование научных знаний в инструменты, предназначенные для решения проблемы регулирования выбросов парниковых газов. В Российской Федерации действуют стандарты ИСО 14060 (ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021, ГОСТ Р ИСО 14064-2-2021 и ГОСТ Р ИСО 14064-3-2021), которые обеспечивают прозрачность и последовательность количественной оценки, мониторинга, отчетности и верификации или валидации выбросов и поглощения парниковых газов в целях поддержания устойчивого развития на основе низкоуглеродной экономики.

По оценке ЮНЕП ООН, с 2008 по 2018 год масса антропогенных выбросов парниковых газов в мире ежегодно увеличивалась на 1,5 процента и в 2018 году достигла 55 млрд. тонн эквивалента углекислого газа. По сравнению с 1990 годом масса глобальных выбросов парниковых газов увеличилась на 40-50 %. При этом основной вклад в увеличение выбросов парниковых газов вносят развивающиеся страны, выбросы которых по сравнению с 1990 годом увеличились от 2 до 4 раз (Report of the Secretary-General on the 2019 Climate Action Summit and the Way Forward in 2020).

В 2021 году в мире было выброшено 51 млрд. тонн парниковых газов в CO_2 эквиваленте (World Energy Outlook 2022). Из них более 30 % составляют выбросы в секторе промышленного производства, включая сталь, цемент, пластик и т.д. Более четверти всех выбросов парниковых газов приходится на деятельность по производству и передаче электроэнергии. Сельское хозяйство и лесоводство составляет 19 % в общих выбросах. Транспорт (личные автомобили, самолеты, поезда и т. д.) составляет 16 %. Холодильные и отопительные установки вносят 7 % выбросов (рис. 1.2.1).

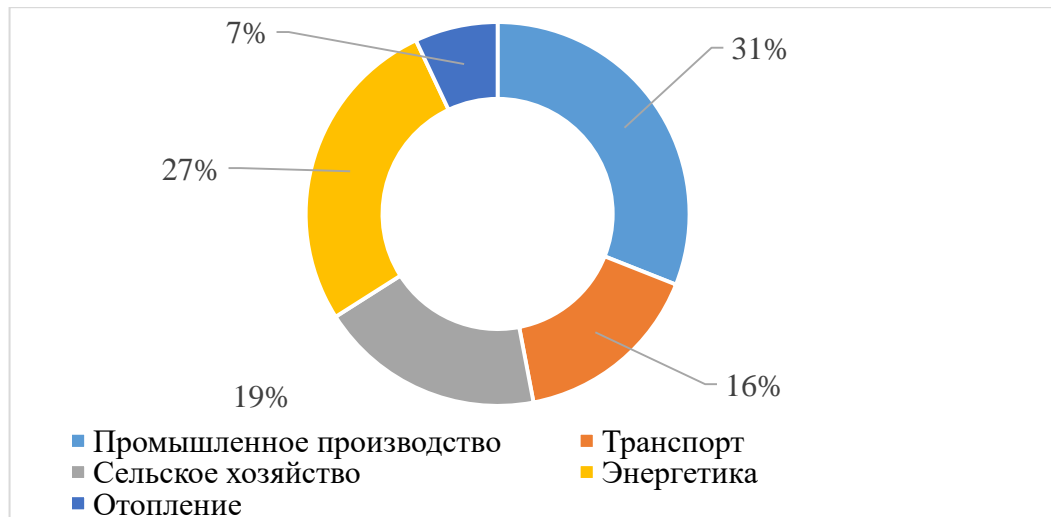


Рисунок 1.2.1. Удельный вес выбросов парниковых газов по секторам в 2021 г. % (World Energy Outlook 2022)

В последнее десятилетие выбросы парниковых газов в мире продолжают расти. Так, например, мировая динамика выбросов CO_2 от сжигания углеводородного топлива нефти, природного газа и угля имеет устойчивый тренд на увеличение и описывается линейной функцией $y = 404,77x + 11148$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,97$ (рис. 1.2.2).

Отмечена высокая корреляционная взаимосвязь между выбросами CO_2 и межгодовой динамикой аномалии среднегодовой приземной температуры воздуха и поверхности моря Северного полушария за рассматриваемый период ($r = 0,940$).

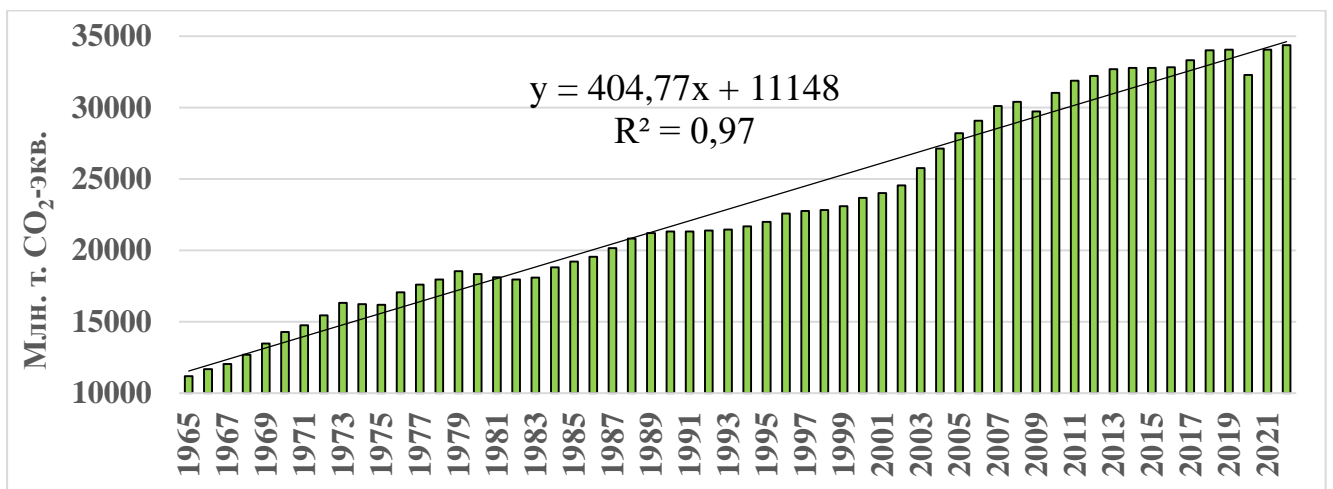


Рисунок 1.2.2. Мировая динамика выбросов CO_2 млн. тонн 1965-2022 гг. (BP Statistical Review of World Energy 2023)

За 2022 г. выбросы CO_2 в мире составили 34 374,1 млн. тонн. Азиатский регион среди основных экономических районов имеет самый сильный тренд на

увеличение показателя выбросов CO₂ и в 1992 году вышел на первое место в мире, обогнав североамериканский регион (рис. 1.2.3)

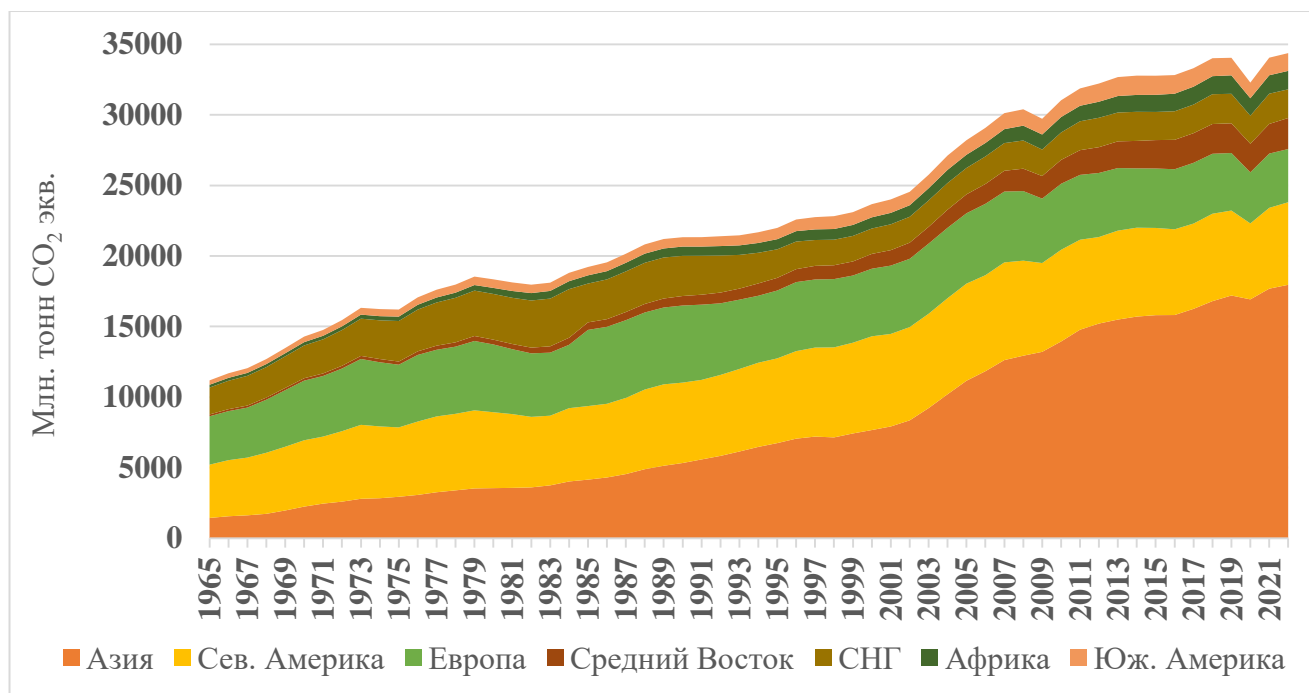


Рисунок 1.2.3. Динамика выбросов CO₂ по основным экономическим районам за период 1965-2022 гг. (BP Statistical Review of World Energy 2023)

Отмечается снижение в динамике выбросов североамериканского региона во главе с США и увеличение азиатского региона во главе с Китаем и Индией. Доля стран СНГ по состоянию на 1965 год составляла 17 %, при этом начиная с 1995 года отмечалось резкое падение показателя до 9 % и его постепенное снижение до 5,9 % к 2022 году.

Таким образом, в 2022 году мировые выбросы парниковых газов от сжигания углеводородного топлива выросли в 3 раза в сравнении с показателями 1965 года, что говорит о продолжающемся росте производства электроэнергии на ТЭС. Существует необходимость в эффективном и последовательном реагировании на угрозу изменения климата на основе наилучших имеющихся научных знаний.

1.3. Воздействие ТЭС на изменение климата и состояние наземных экосистем

Деятельность объектов тепловой энергетики является одной из основных угроз для наземных экосистем и оказывает антропогенное воздействие на все компоненты природной среды – землю, недра, почвы, поверхностные и подземные

воды, атмосферный воздух, растительный, животный мир. Воздействие объектов тепловой энергетики на изменение климата имеет комплексный характер и создает значительные риски для инфраструктуры и отраслей экономики, зависимых от климатических тенденций и флуктуаций (Артамонов, Гутников, 2012, 2013, Ядутов и др., 2013).

Динамика производства электроэнергии в мире с 1985 года имеет устойчивый тренд на увеличение и описывается линейной функцией $y = 523,59x + 8075,3$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,98$ (рис. 1.3.1). К 2022 году показатель вырос почти в 3 раза.

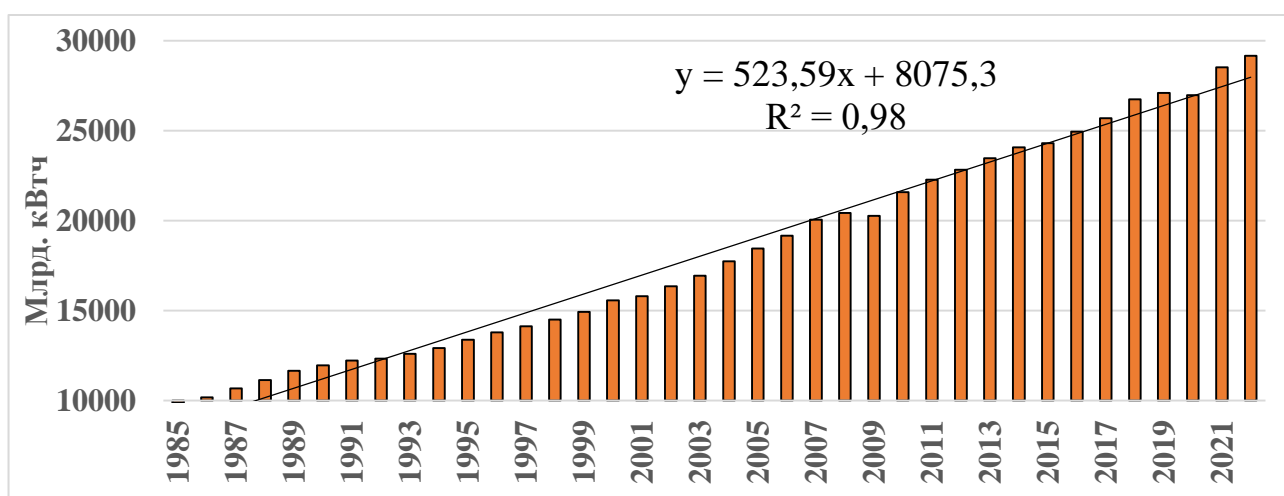


Рисунок 1.3.1. Мировая динамика производства электроэнергии 1985-2022 гг. (BP Statistical Review of World Energy 2023)

На конференции ООН по вопросам изменения климата в Глазго в ноябре 2021 г. более 40 государств достигли договоренности отказаться от использования угля, что имеет свои последствия для Российской Федерации поскольку в топливном балансе энергоресурсов объектов тепловой энергетики России уголь занимает около 25 %. Большое значение объектов теплоэнергетики и широкая распространенность их по всей территории страны в сравнении с атомной и гидравлической энергетикой, является результатом исторически сложившейся ситуации и экономической необходимостью территориального развития России (План ГОЭЛРО, 1955).

Выбросы в энергетике обусловлены добычей, первичной переработкой, транспортировкой и использованием природного топлива (нефти, природного и

нефтяного попутных газов, угля, торфа и др.), а также продуктов его переработки. В Российской Федерации объекты тепловой энергетики занимают лидирующее место по удельным выбросам загрязняющих веществ в атмосферу согласно информации Росгидромета и Минприроды. Многие ТЭС входят в перечень объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, относящихся к I категории, вклад которых в суммарные выбросы загрязняющих веществ в Российской Федерации составляет не менее чем 60 процентов (Приказ Минприроды России от 18.04.2018 № 154).

Как уже было сказано ранее основную часть вредных выбросов в атмосферу составляют парниковые газы (CO_2 , CH_4 , N_2O), а также газы с косвенным парниковым эффектом (NO_x , CO и SO_2). Объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу зависит от вида топлива, состояния оборудования, используемого при производстве электроэнергии, коэффициента использования установленной мощности (Бекиров, Абибуллаев, 2013). Пространственные объемы воздействия антропогенных выбросов на экосистемы определяются площадью территории регионов России и численностью населения. Способность наземных экосистем к поглощению парниковых выбросов в большой степени зависит от физико-географических и природно-климатических особенностей территории, а также от состояния и уровня деградации наземных экосистем.

Несбалансированное количество выбросов парниковых газов в России способствует региональному изменению климата, а также имеет негативное воздействие на способность выполнения компонентами наземных экосистем экосистемных функций, при этом ввиду строительства новых тепловых электростанций и объектов их инфраструктуры происходит изъятие из естественного оборота ценных наземных экосистем, имеющих высокий экологический потенциал и которые могут быть использованы для других целей (Грачев и др., 2017).

Наземные экосистемы выполняют климаторегулирующие, водорегулирующие, почвозащитные, ассимиляционные, биопродукционные, биоресурсные, рекреационные функции, а также участвуют в сохранении

биоразнообразия и стабилизации состава атмосферы. Кроме того, они являются источником биологических ресурсов, естественными хранилищами генофонда видовой разнообразия, регуляторами биогеохимических циклов и элементов, а также обладают культурной и эстетической ценностью (Букварева и др., 2018; Morel et al., 2015).

Проведенный анализ динамики выбросов NO_x и CO_2 по России от стационарных источников показал, что с 2015 года выбросы загрязняющих веществ стабилизировались (рис. 1.3.2).

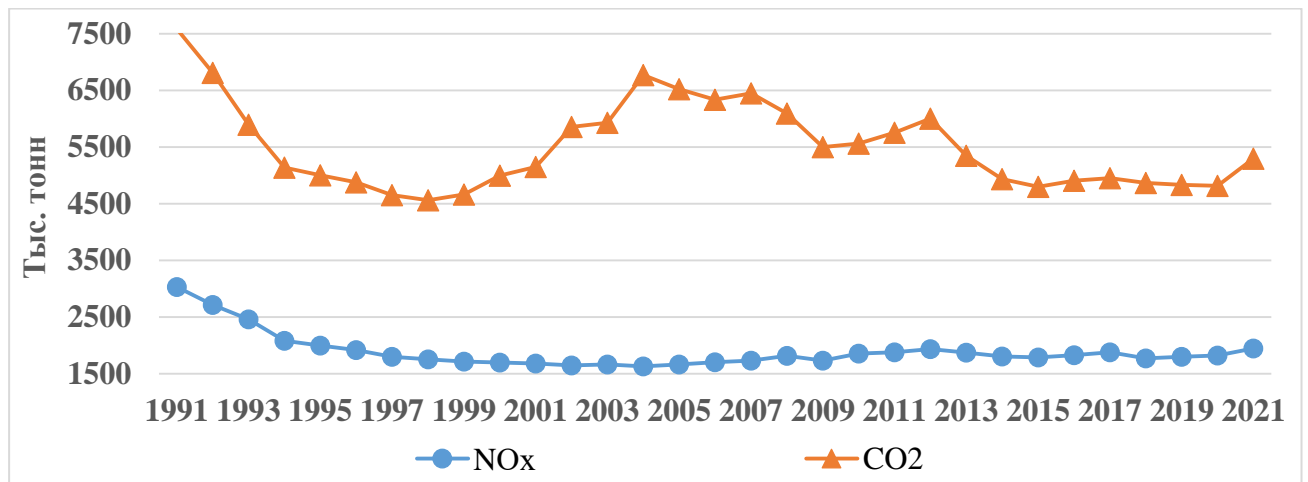


Рисунок 1.3.2. Выбросы NO_x и CO_2 от стационарных источников, тыс. тонн с 1991 – 2021 г. (Российский статистический ежегодник, 2022)

В городах и на прилегающих к ним территориях, в которых проживает 74 % населения страны, наблюдается устойчивая тенденция к превышению санитарно-гигиенических норм по содержанию в атмосфере вредных веществ от деятельности объектов тепловой энергетики. В городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения воздуха проживает 17,1 млн. человек, что составляет 17 процентов городского населения страны, доля ТЭС в суммарных показателях загрязнения атмосферы остается значительной (Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2021 г.). Например, объем выбросов Биробиджанской ТЭЦ вносит основной вклад в объем выбросов от стационарных источников Еврейской автономной области – около 45 %, кроме того, доказана связь заболеваемости органов дыхания у детей в дошкольных учреждениях, размещенных в санитарно-

защитной зоне Биробиджанской ТЭЦ с деятельностью электростанции (Ревуцкая, 2008).

Выбросы ТЭС содержат элементы, активно участвующие в жизненном цикле углерода и азота, при этом многие специфические вещества, обладающие высокой биологической опасностью, не нормируются в выбросах ТЭС (Мауричева, Киселев, 2006). Тепловые электростанции, использующие в качестве основного вида топлива уголь, имеют наивысшие показатели выбросов загрязняющих веществ. Кроме того, для них характерно наличие золоотвалов, строительство, которых подразумевает изъятие наземных экосистем и создает дополнительные риски для окружающей среды.

С поверхности золоотвалов происходит вынос пылевых частиц в результате ветровой эрозии и осаждение их на почве, что приводит к загрязнению атмосферного воздуха и почвенно-растительного покрова. Физико-механические свойства золошлаковых отходов подтверждают большую вероятность пыления и рассеивания загрязняющих частиц на прилегающие территории, что связано с их низкой способностью к оструктуриванию и очень слабой противоэрозионной стойкостью (Черенцова, Майорова, 2015). Микроэлементы золы от выбросов угольных электростанций обнаруживаются в наземных экосистемах (Черенцова, Майорова, 2014).

Продукты сгорания твердого и жидкого топлива ТЭС обнаруживаются в городских почвах (Кочуров, Ивашкина, 2010). При этом, радиус воздействия ТЭС на окружающую среду велик и зависит от высоты трубы и метеоусловий. При трубе высотой 300 м радиус действия достигает 50 км. В последние годы на ряде ТЭС мощностью более 3000 МВт установлены дымовые трубы высотой 320 м, а для ГРЭС мощностью 4000 МВт и более спроектированы трубы высотой 360 и 420 м. Несомненно, высокие трубы резко снижают концентрацию загрязнений атмосферного воздуха в районах размещения ТЭС, однако с увеличением высоты трубы расширяется и зона загрязнения окружающей среды. По некоторым данным, негативное воздействие выбросов угольных ТЭС на наземные экосистемы сохраняется в радиусе до 80 км (Алексашина, 2013).

Установлено деградирующее воздействие выбросов ТЭЦ на лесные экосистемы в том числе для ТЭЦ, использующих в качестве основного вида топлива природный газ (Пчелина, 2009).

Анализ динамики установленной мощности ТЭС и производства электроэнергии в России показал, что с 2014 года наметился устойчивый спад производства электроэнергии в то время, как установленная мощность продолжает увеличиваться (рис. 1.3.3). Поэтому при вводе в эксплуатацию новых мощностей имеется возможность поэтапной модернизации или вывода из эксплуатации энергетических объектов с устаревшим оборудованием и необоснованно высоким уровнем воздействия на окружающую среду. По результатам за 2021 год удельный вес производства электроэнергии увеличился, в то время как установленная мощность продолжает снижаться.

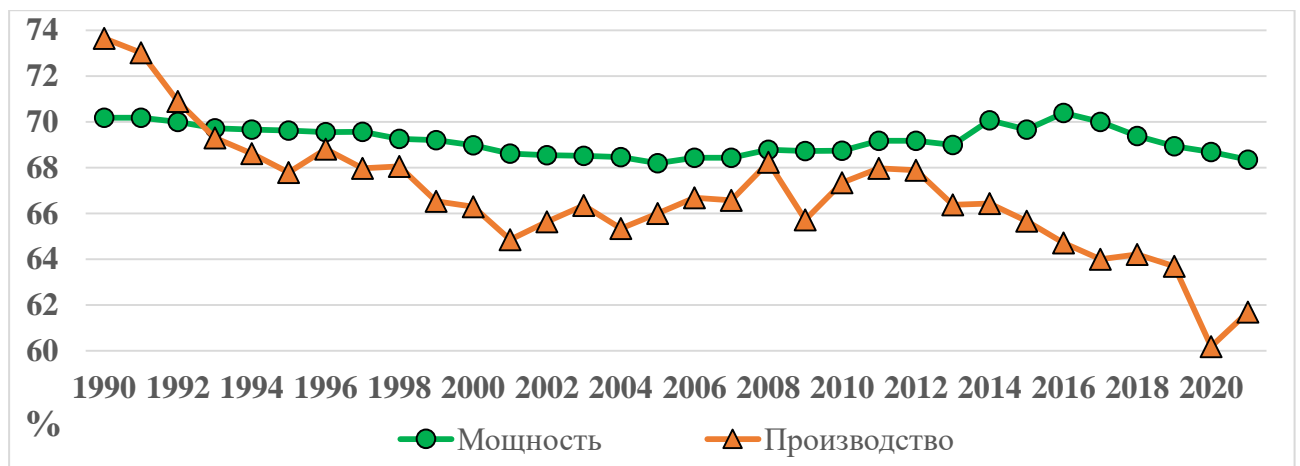


Рисунок 1.3.3. Динамика удельного веса мощности и производства электроэнергии в России на ТЭС за период 1990-2021 гг. (Промышленное производство в России, 2021)

Согласно оценкам, полученным с помощью современных климатических моделей, в течение всего XXI века Россия останется регионом мира, где потепление климата существенно превышает среднее глобальное потепление. Наиболее быстрыми темпами росла температура Северной полярной области, особенно в последние десятилетия. Ожидаются значительные изменения других климатических характеристик, причем в разных регионах России эти изменения могут существенно различаться (Шерстюков, 2023).

Для достижения Российской Федерацией к 2060 году углеродной нейтральности территории, предусмотренной стратегией низкоуглеродного развития, необходимо проведение экологической оценки ассимиляционного потенциала различных видов наземных экосистем. Без участия Российской Федерации в борьбе за достижение углеродной нейтральности общемировые меры будут недостаточно эффективными ввиду большого размера территории страны и уровня развития теплоэнергетической отрасли.

1.4. Регулирование выбросов парниковых газов

Существует необходимость в эффективном государственном регулировании количества антропогенных выбросов парниковых газов от деятельности объектов тепловой энергетики на основе наилучших имеющихся научных знаний. Инициативы по минимизации выбросов парниковых газов основываются на количественной оценке, мониторинге, предоставлении отчетности и верификации выбросов и их поглощения экосистемами.

Для стабилизации концентрации парниковых газов в атмосфере принята Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН), которая в настоящее время является правовой основой международного взаимодействия по вопросам изменения климата.

В целях активизации международных усилий по достижению конечной цели Рамочной конвенции на Конференции Сторон Рамочной конвенции в 2015 году было принято Парижское соглашение по климату, в ключевые положения которого включены удержание прироста глобальной средней температуры до конца XXI века в пределах не более 2°C сверх доиндустриальных уровней и приложение усилий в целях ограничения роста температуры до 1,5°C, а также достижение сбалансированности между антропогенными выбросами парниковых газов, получаемых в результате промышленной деятельности человека и их абсорбцией поглотителями парниковых газов к которым относятся: наземные экосистемы включая лесные, аграрные, прибрежные, а также морские экосистемы и океаны.

В качестве национального вклада в глобальное реагирование на угрозу изменения климата многие страны заявляют целевые показатели ограничения выбросов парниковых газов. При этом более 60 стран заявили о цели достижения углеродной нейтральности к 2050 – 2060 годам и ранее (Великобритания, государства – члены Европейского союза, Соединенные Штаты Америки, Китайская Народная Республика, Япония и др.).

По оценке Программы Организации Объединенных Наций по населенным пунктам (ООН Хабитат) (World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities), до 70 процентов глобальных антропогенных выбросов парниковых газов приходится на города. В связи с этим ряд городов реализует собственные климатические стратегии и планы, включающие в числе прочего стремление достичь «углеродной нейтральности». О намерении достичь «углеродной нейтральности» к 2050 году в настоящее время объявили более 100 городов, отдельные города планируют достичь «углеродной нейтральности» к 2025 – 2040 годам (Стокгольм, Хельсинки, Копенгаген и другие). Есть также климатические инициативы, в которых участвуют российские города (например, в Глобальном пакте мэров по климату и энергетике участвуют города Москва и Ростов-на-Дону).

Все большее число транснациональных корпораций участвуют в различных инициативах, направленных на сокращение выбросов парниковых газов, увеличение потребления возобновляемой энергии, повышение энергетической эффективности и содействие устойчивому развитию. Ряд крупных корпораций принял собственные стратегии развития с низким уровнем выбросов парниковых газов, в которых обозначены амбициозные планы по достижению «углеродной нейтральности» к 2050 году и ранее.

Устойчивое развитие мировой энергетики рассматривается в международной повестке в контексте перехода на технологии, использующие энергию солнца, ветра, биомассы, биогаза, геотермальной энергии, а также развитие технологий атомной и водородной энергетики.

Глобальный энергопереход формирует новые тренды для устойчивого развития мировой энергетики и экономики и определяет новые вызовы для стран - экспортеров углеводородного сырья, связанные со снижением спроса на это сырье. Российская Федерация является стороной РКИК ООН, Киотского протокола к РКИК ООН и Парижского соглашения.

В соответствии с обязательствами по статьям 4 и 12 РКИК ООН, Российская Федерация разрабатывает, публикует национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями всех парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом. В соответствии со статьей 7 Киотского протокола, Российская Федерация включает в национальный кадастр дополнительную информацию, необходимую для целей обеспечения соблюдения Протокола.

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 01.03.2006 № 278-р была создана и функционирует Российская система оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой, принятым в 1987 г.

В кадастр включены данные о выбросах и абсорбции всех парниковых газов, указанных в Приложении «А» Киотского протокола, а также газов с косвенным парниковым эффектом. Оценки выбросов или абсорбции выполняются для всех категорий источников и поглотителей по классификации МГЭИК, за исключением тех категорий, для которых на территории России отсутствует хозяйственная или иная деятельность, приводящая к выбросам/абсорбции. Оценки выбросов и абсорбции охватывают всю территорию Российской Федерации. Природные (не антропогенные) выбросы и абсорбция в кадастре не учитываются.

Проблема сокращения выбросов парниковых газов также отражена в Указе Президента Российской Федерации от 04.11.2020 № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов», на основании которого, а также в целях реализации Парижского соглашения Правительству Российской Федерации необходимо:

– обеспечить к 2030 году сокращение выбросов парниковых газов до 70 % относительно уровня 1990 года с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития Российской Федерации;

– разработать с учетом особенностей отраслей экономики Стратегию социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года и утвердить ее;

– обеспечить создание условий для реализации мер по сокращению и предотвращению выбросов парниковых газов, а также по увеличению поглощения таких газов.

Во исполнение данного Указа Президента РФ и в целях реализации статьи 4 Парижского соглашения подготовлена и распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р утверждена стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (Стратегия низкоуглеродного развития). Стратегия разработана в соответствии со статьей 19 Федерального закона «О стратегическом планировании в Российской Федерации» и учитывает положения документов стратегического планирования, разработанных на федеральном уровне.

Приоритетом стратегии низкоуглеродного развития является выполнение задачи, поставленной в Послании Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации от 21.04.2021 по сокращению в период с 2021 – 2050 годы накопленного объема чистой эмиссии парниковых газов в Российской Федерации до более низких значений по сравнению с показателями Европейского союза, что будет способствовать удержанию прироста глобальной средней температуры с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития Российской Федерации.

В целевые значения Стратегии низкоуглеродного развития включены показатели снижения выбросов парниковых газов и увеличения поглощения выбросов экосистемами, к 2030 году планируется реализовать сокращение

выбросов парниковых газов до 70 процентов относительно уровня 1990 года (табл. 1.4.1).

Таблица 1.4.1. Целевые значения стратегии низкоуглеродного развития РФ (млн. тонн CO₂-экв.)

Наименование показателя	Факт – 2019	План – 2030	План – 2050
Инерционный сценарий			
Выбросы парниковых газов	2119	2253	2521
Поглощения	-535	-535	-535
Нетто-выбросы	1584	1718	1986
Целевой (интенсивный) сценарий			
Выбросы парниковых газов	2119	2212	1830
Поглощения	-535	-539	-1200
Нетто-выбросы	1584	1673	630

В стратегию вошли все сформированные за последние 10 лет основные подходы к регулированию выбросов парниковых газов, в том числе и от деятельности энергетической отрасли.

Например, углеродное ценообразование, система квотирования выбросов парниковых газов, внедрение нормативных требований по обязательному применению и стимулированию внедрения технологий с низкими показателями выбросов парниковых газов и высокими показателями энергетической и ресурсной эффективности, корректировка налога на добычу полезных ископаемых и иных налогов и сборов применительно к наиболее неэффективным углеродоёмким отраслям экономики, также будут учитываться результаты экспериментов по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах РФ.

Реализация «зеленых» проектов, при соответствии которых установленным на национальном уровне критериям для их реализации, станет возможным привлечение финансирования через специальные облигации и займы. Внедрение стандартов системы валидации и верификации климатических проектов и верификации углеродной отчетности также предусмотрено целевым (интенсивным) сценарием. Правительством Российской Федерации в 2021 году

уже утверждены критерии проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации (Постановление Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587).

По своей значимости для экономики энергетическая отрасль относится к одному из основных направлений устойчивого (в том числе зеленого) развития Российской Федерации, обеспечивающей в рамках выработки государственной политики Российской Федерации достижение целей, установленных Распоряжением Правительства РФ от 14.07.2021 № 1912-р, которые включают в себя:

- охрану или улучшение состояния окружающей среды;
- снижение выбросов и сбросов загрязняющих веществ и (или) предотвращение их влияния на окружающую среду;
- сокращение выбросов парниковых газов;
- энергосбережение и повышение эффективности использования ресурсов.

По результатам достижения вышеуказанных целей, предполагается получение экологического эффекта от реализации зеленого или адаптационного проекта, который имеет долгосрочное и существенное положительное влияние на климат и окружающую среду и определен количественно.

Еще одним инструментом регулирования выбросов парниковых газов, внедрение которого значимо для реализации сценариев стратегии низкоуглеродного развития, являются сертификаты происхождения энергии по факту производства электроэнергии на безуглеродных генерирующих объектах и генерирующих объектах с низким уровнем выбросов парниковых газов, которые удостоверяют права, обусловленные позитивными экологическими и социальными эффектами, созданными в ходе генерации: сокращение выбросов и уменьшение объема отходов, снижение вреда окружающей среде и здоровью людей.

Федеральным законом от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» закреплено право организаций и ИП реализовывать климатические проекты. Предусмотрена новая категория имущественных прав – углеродная единица. Это верифицированный результат реализации

климатического проекта, выраженный в массе парниковых газов, эквивалентной 1 тонне CO₂. Прописаны меры по ограничению выбросов парниковых газов.

Также предусмотрена обязанность хозяйствующих субъектов, деятельность которых сопровождается значительными выбросами парниковых газов, предоставлять в уполномоченный орган отчеты о выбросах парниковых газов, урегулированы вопросы ведения реестра выбросов. Так уже с января 2023 года углеродная отчетность становится обязательно для предприятий, что актуализирует задачи по верификации расчетов углеродного и азотного следа (Постановление Правительства РФ от 20.04.2022 № 707).

Начиная с 01.01.2023 вышеуказанные отчеты должны будут предоставлять регулируемые организации, деятельность которых сопровождается выбросами парниковых газов, масса которых эквивалентна 150 и более тысячам тонн углекислого газа в год. Начиная с 2025 года отчитываются компании, если масса выбрасываемых парниковых газов эквивалентна 50 и более тысячам тонн углекислого газа в год.

В законодательстве РФ также предусмотрены требования при проектировании, строительстве, реконструкции, вводе в эксплуатацию и выводе из эксплуатации объектов энергетики – они должны оснащаться техническими средствами и технологиями, направленными на комплексное предотвращение и (или) минимизацию негативного воздействия на окружающую среду (Федеральный закон «Об охране окружающей среды», 2002).

Нормативная правовая база по регулированию выбросов парниковых газов в Российской Федерации продолжает активно развиваться с учетом передового международного опыта.

1.5. Экологическая оценка выбросов парниковых газов в энергетике

Существуют разные подходы к экологической оценке деятельности объектов тепловой энергетики. Традиционно наибольшее внимание уделяется проблемам загрязнения атмосферы, связанные с выбросами загрязняющих веществ на ТЭС, при этом в последнее десятилетие основной акцент сместился в сторону оценки

удельных выбросов парниковых газов. Так, например, за 2022 год выбросы CO₂ в результате потребления нефти, газа и угля для деятельности, связанной с сжиганием топлива в мире составили 34 374 млн. тонн (доля России составила 1 457 млн. тонн или 4,2 %).

Самыми крупными эмитентами CO₂ являются Китай и США. Только на эти две страны вместе приходится около 45 % общемировых выбросов CO₂. На пять стран – Китай, США, Индию, Россию и Японию – приходится более 60 % всех выбросов. На долю стран «Большой двадцатки» приходится около 80 % эмиссии (табл.1.5.1). Участниками стран «G20» являются 20 крупнейших национальных экономик, в совокупности представляет почти 85 % мирового ВВП, около 80 % производства электроэнергии и две трети населения мира (Артамонов, Гутников, 2013). Крупнейшими угольными электростанциями в мире являются: японская Tuoketuo (6720 МВт), китайская Таean (6400 МВт), тайваньская Taichung (5600 МВт), польская Belchatow (5100 МВт).

Таблица 1.5.1. Сравнительная оценка стран G20 по выбросам CO₂ (U.S. Energy Information Administration, 2021)

№	Страна	2021 млн. т/год	2021, удельный вес в %
1	Китай	10523,1	31,1
2	США	4701,1	13,9
3	Индия	2552,8	7,5
4	Россия	1581,3	4,7
5	Япония	1053,7	3,1
6	Германия	628,9	1,9
7	Южная Корея	603,8	1,8
8	Саудовская Аравия	575,3	1,7
9	Индонезия	572,5	1,7
10	Канада	527,4	1,6
11	ЮАР	438,9	1,3
12	Бразилия	436,6	1,3
13	Турция	403,3	1,2
14	Мексика	373,8	1,1
15	Австралия	369,4	1,1
16	Великобритания	337,7	1,0
17	Италия	311,2	0,9
18	Франция	273,6	0,8
19	Испания	245,7	0,7
20	Аргентина	181,7	0,5
#	Всего 20 стран	26 691	79 %

Крупнейшими эмитентами CO₂ в Европе являются энергетические компании Германии, Великобритании, Франции и Италии (E.ON, RWE, LEAG). Польская электростанция Belchatow и немецкая ТЭС Niederaussem имеют самые высокие показатели выбросов CO₂ в Европе. Они используют в качестве основного вида топлива уголь (табл. 1.5.2).

Таблица 1.5.2. Сравнительная оценка углеродного следа крупнейших объектов тепловой энергетики в 2009 и 2018 году (Don Grant et al., 2021).

№	Название	Мощность	Топливо	Страна	Выбросы CO ₂ за 2018 (млн т/год)	Углеродный след, г. CO ₂ e/кВтч*
2009						
1	ТЭС «Taichung»	5834	Уголь	Тайвань	36,3	1 420,6
2	ТЭС «Poryong»	5954	Уголь	Южная Корея	32,8	1 257,7
3	ТЭС «Taean»	4100	Уголь	Южная Корея	30,3	1 687,3
4	ТЭС «Belchatow»	4340	Уголь	Польша	29,5	1 551,9
5	ТЭС «Dangjin»	4075	Уголь	Южная Корея	29	1 624,8
6	ТЭС «Hadong»	4000	Уголь	Южная Корея	28,7	1 638,1
7	ТЭС «Niederaussem»	3826	Уголь	Германия	26,3	1 569,4
8	ТЭС «Mailiao Fp»	4200	Уголь	Тайвань	25,3	1 375,3
9	ТЭС «Vindhyachal»	3260	Уголь	Индия	24,8	1 736,8
10	ТЭС «Kendal»	4374	Уголь	ЮАР	24,6	1 284,1
2018						
1	ТЭС «Belchatow»	5298	Уголь	Польша	37,6	1 620,3
2	ТЭС «Vindhyachal»	4760	Уголь	Индия	33,8	1 621,2
3	ТЭС «Dangjin»	6115	Уголь	Южная Корея	33,5	1 250,8
4	ТЭС «Taean»	6100	Уголь	Южная Корея	31,4	1 175,2
5	ТЭС «Taichung»	5834	Уголь	Тайвань	29,9	1 170,1
6	ТЭС «Tuoketuo»	6720	Уголь	Китай	29,4	998,9
7	ТЭС «Niederaussem»	3826	Уголь	Германия	27,2	1 623,1
8	ТЭС «Sasan Umpp»	3960	Уголь	Индия	27,1	1 562,4
9	ТЭС «Yonghungdo»	5080	Уголь	Южная Корея	27	1 213,5
10	ТЭС «Hekinan»	4100	Уголь	Япония	26,6	1 481,2

*- данные рассчитаны исходя из показателя коэффициента используемой установленной мощности (КИУМ) – 50 %

Китайская электроэнергетическая компания Huaneng Power International имеет самые высокие показатели выбросов CO₂. Среди тепловых электростанций Тайваньская ТЭС Taichung имела самые высокие выбросы CO₂ в 2009 году – 36,3 млн. тонн, в 2018 году польская ТЭС Belchatow выбросила 37,6 млн. тонн. Наиболее значимый вклад в глобальные антропогенные выбросы парниковых газов

вносят электростанции КНР, Тайваня, Польши, Южной Кореи, Индии, Японии и ЮАР (Tong et al., 2018).

В Российской Федерации согласно данным АО «СО ЕЭС» суммарная установленная мощность тепловых электростанций, входящих в единую энергетическую систему России (ЕЭС) на 01.01.2023 составила 163 ГВт или 66 % от общей установленной мощности электростанций ЕЭС России. Общее потребление электроэнергии в 2022 году в России составило 1106,3 млрд кВтч (Отчет о функционировании ЕЭС России в 2022 году).

В России в энергетическом секторе выбросы парниковых газов в эквиваленте CO_2 составили 1,598 млрд. тонн, что на 38 % ниже уровня 1990 года. В их составе преобладал CO_2 – 89,6 % всех выбросов по сектору. Вклады CH_4 и N_2O составили 10,1 % и 0,3 % соответственно (Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом в 2020 году, 2022).

Динамика выбросов парниковых газов с 1990 года показывает цикличность выбросов, которая связана с климатическими флуктуациями и тенденцией уровня развития генерации электроэнергии на ТЭС. В 1998, 2009 и 2015 годах хорошо просматривается спад выбросов парниковых газов, что связано с финансовыми и экономическими факторами, к 2050 году прогнозируется снижение выбросов парниковых газов на 75 % относительно 1990 года (Рис. 1.5.1).

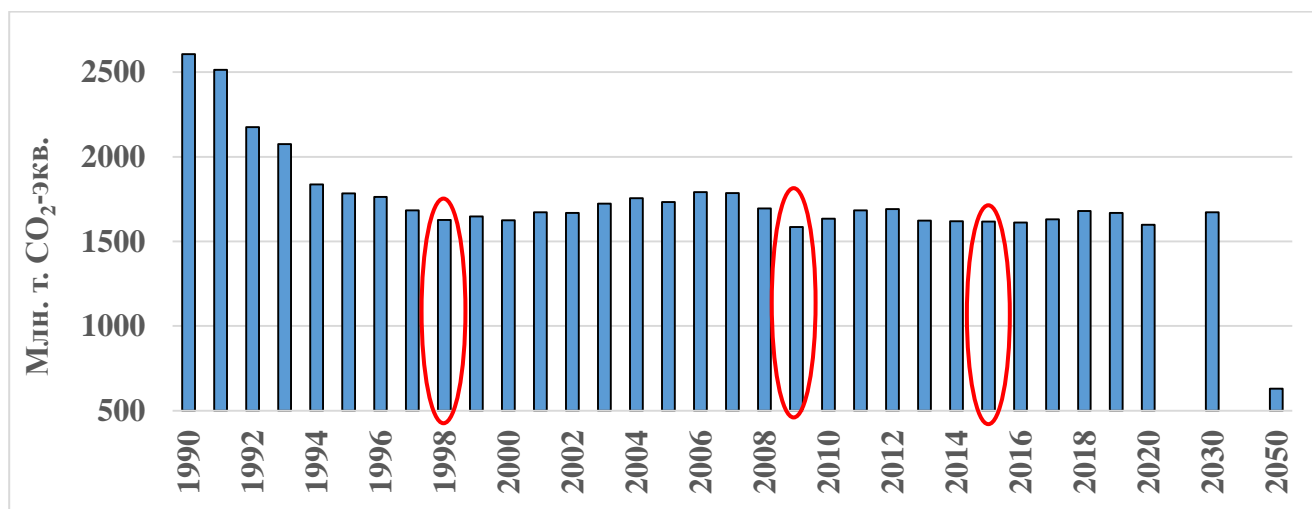


Рисунок 1.5.1. Динамика выбросов парниковых газов в секторе «Энергетика» за 1990-2050 гг., с учетом прогнозных данных стратегии низкоуглеродного развития.

На протяжении 1990 – 1998 гг. в России происходило значительное сокращение выбросов, обусловленное экономической ситуацией в стране, сдвигами в структуре экономики и структуре топливного баланса. В 1999 – 2008 гг., в период экономического подъема, происходившего как в сфере производства, так и в сфере потребления, выбросы имеют устойчивый рост, однако темп увеличения выбросов был значительно ниже темпа их спада в предшествующие годы.

Так, с 1990 – 1998 гг. величина совокупного выброса, без учета сектора землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ), уменьшилась на 1 295,2 млн. тонн CO₂-экв., а с 2000 г. по 2008 г. она возросла лишь на 161,7 млн. тонн в CO₂-экв.

На протяжении всего периода 1990 – 2020 гг. в секторе ЗИЗЛХ абсорбция парниковых газов преобладала над выбросами. В 1990 г. величина антропогенного нетто-поглощения парниковых газов из атмосферы составляла 73,6 млн. тонн CO₂-экв.; в 2020 г. сектор обеспечивал нетто-поглощение парниковых газов из атмосферы в размере 569,2 млн. тонн CO₂-экв., компенсируя тем самым 27,7 % общего выброса парниковых газов в других секторах. Динамика выбросов в секторе ЗИЗЛХ в период 1990-2019 гг. определялась следующими факторами:

- увеличением поглощения на территории управляемых лесов вследствие сокращения объема лесозаготовки и увеличения площади управляемых лесов;
- аккумуляцией почвенного органического углерода на землях, переведенных из пахотных в кормовые угодья, в связи с ростом их площадей.

В структуре выбросов парниковых газов в РФ доминирует энергетический сектор, доля которого в совокупных выбросах составляла в 2020 г. 78,7 %. Уменьшился до 5,4 % вклад в совокупный выброс сектора «Сельское хозяйство» и несколько возрос по сравнению с 1990 г. вклад промышленного сектора, составивший в 2019 г. 11,2 %. Сектор «Отходы» по-прежнему занимает последнее место по вкладу в совокупный выброс несмотря на то, что его выбросы возросли между 1990 и 2020 гг. в 1,7 раза (рис. 1.5.2).

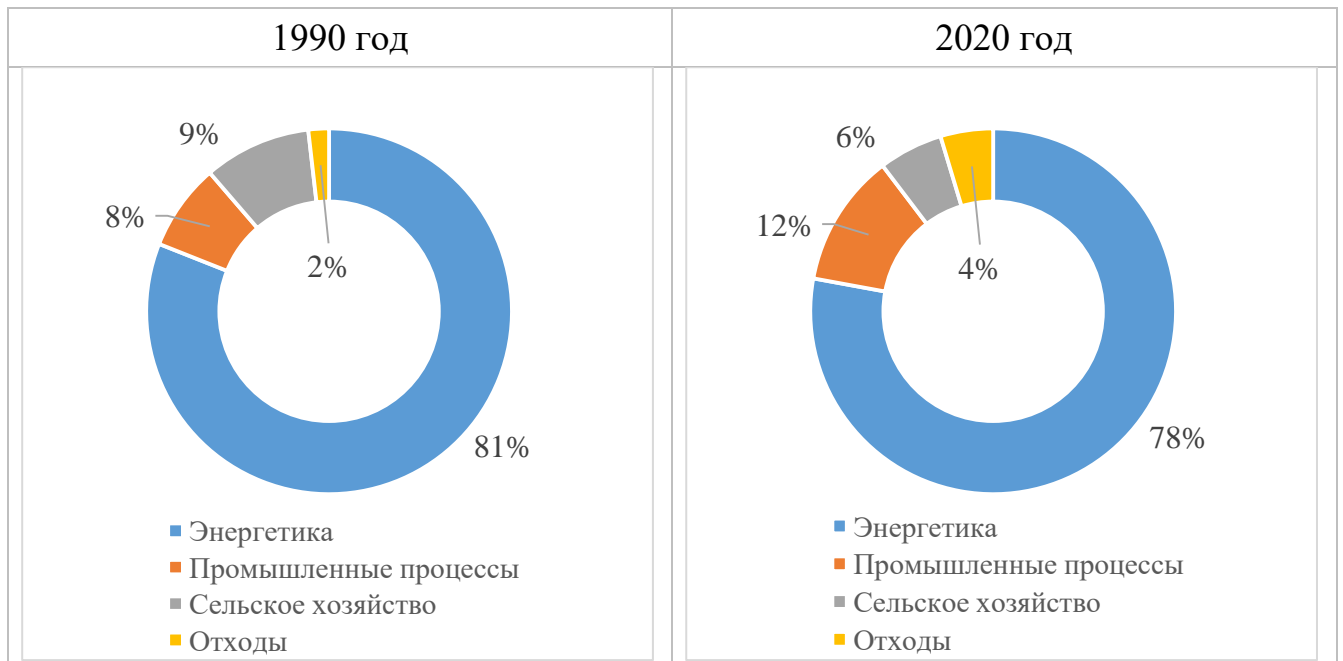


Рисунок 1.5.2. Тенденция выбросов парниковых газов в РФ по секторам в 1990 и 2020 г., млн. тонн CO₂-экв.

В среднем за период с 1990 по 2020 гг. наибольшее количество выбросов парниковых газов энергетическом секторе также приходится на CO₂ – 88,5 %; CH₄ – 11,1 %; N₂O – 0,4 % (Табл. 1.5.3).

Таблица 1.5.3. Динамика выбросов парниковых газов в РФ в секторе «Энергетика», млн. тонн CO₂-экв. и %.

Год	Всего	CO ₂	%	CH ₄	%	N ₂ O	%
1990	2568,7	2289,7	89,1	265,2	10,3	13,8	0,5
1995	1664,5	1461,7	87,8	194,4	11,7	8,3	0,5
2000	1514,9	1315,6	86,8	192,5	12,7	6,8	0,4
2005	1583,6	1372,3	86,7	204,2	12,9	7,1	0,4
2015	1616,5	1437,9	89,0	172,5	10,7	6,1	0,4
2020	1597,7	1431,5	89,5	160,7	10	5,5	0,3

Определенный вклад в динамику выбросов вносят межгодовые колебания температуры воздуха на территории России, оказывающие свое влияние опосредованно, через изменение потребления ископаемых видов топлива, оказывающие влияние на величину выбросов в секторе «Энергетика». Крупнейшие российские объекты тепловой энергетики, имеющие наиболее высокие показатели выбросов CO₂, представлены в таблице 1.5.4.

Таблица 1.5.4. Крупнейшие российские ТЭС с наибольшими выбросами CO₂

Название	Мощность, МВт	Топливо	Выбросы CO ₂ за 2015 тонн/год)*	Углеродный след, г. CO ₂ e/кВтч
Троицкая ГРЭС	1315	Уголь	22 950,3	16,060
Сургутская ГРЭС-2	5657	Газ	17 950,1	0,590
Благовещенская ТЭЦ	400	Уголь	16 273,4	7,731
Бийская ТЭЦ	535	Уголь	12 198,8	4,579
Якутская ГРЭС	368	Газ	6 224,3	6,032
Сургутская ГРЭС-1	3333	Газ	5 611,5	0,301
Невинномысская ГРЭС	1530	Газ	4 687,5	0,575
Курганская ТЭЦ	450	Газ, Уголь	4 511,5	3,598
Киришская ГРЭС	2595	Газ	4 007,1	0,689
Барнаульская ТЭЦ-2	275	Уголь, Газ	3 864,1	2,950
Красноярская ТЭЦ-3	206	Уголь	3 430,4	3,844
Приморская ГРЭС	1467	Уголь	2 973,1	0,595
Няганская ГРЭС	1302	Газ	2 943,2	0,287
Правобережная ТЭЦ-5	643	Газ	2 938,5	0,933
Южно-Кузбасская ГРЭС	554	Уголь	2 803,4	1,549
Южноуральская ГРЭС	747	Уголь, Газ	2 793,9	1,986
Хабаровская ТЭЦ-3	720	Уголь, Газ	2 261,2	0,642
Рязанская ГРЭС	3130	Уголь, Газ	2 058,5	0,678
Первомайская ТЭЦ-14	524	Газ	2 011,4	1,243
Ириклинская ГРЭС	2400	Газ	2 006,7	0,327

* – по данным информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям (ИТС 38-2017)

1.6. Методология оценки углеродного следа объектов тепловой энергетики

Одним из важнейших циклов на Земле является биогеохимический круговорот углерода, который будучи структурной единицей большого количества различных органических соединений, участвует как в построении живых организмов, так и в обеспечении их жизнедеятельности. Углерод содержится в атмосфере в виде углекислого газа (CO₂), угарного газа (CO), метана (CH₄) и некоторых других углеводородов, CO окисляется до CO₂. Метан и углекислый газ являются парниковыми газами, угарный газ не оказывает влияние на парниковый эффект. Время жизни метана оценивается в 10-14 лет, а время жизни углекислого газам – в 3-5 лет (Кудеяров, 2019).

Углерод в составе углекислого газа поглощают растения в процессе фотосинтеза и преобразуют в органические вещества, которые служат пищей для консументов первого порядка (Карпачевский, 2008). Используя других животных

в качестве пищи, консументы второго порядка получают углерод в составе органических веществ. Обратно в природу углерод попадает при дыхании (в виде углекислого газа) и при гниении органических тканей. При его попадании в атмосферу круговорот элемента начинается заново. Помимо естественных источников углерод может попадать в экосистемы в результате сжигания углеводородного топлива. Поэтому необходимо системное рассмотрение вопроса поступления в наземные экосистемы антропогенного углерода в контексте с уровнем интенсивности выбросов парниковых газов от объектов тепловой энергетики с учетом региональных особенностей наземных экосистем (Абдуллина, Подольский, 2020; Кудеяров и др., 2007).

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

Согласно ГОСТ Р ИСО 14067-2021 углеродный след представляет собой сумму выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов в производственной системе, выраженная в единицах CO₂-эквивалента и основанная на оценке жизненного цикла продукции с использованием одной категории воздействия – изменение климата.

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 (Белова и др., 2020; Кудеяров, 2018).

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. Накоплен

экспериментальный материал по анализу ассимиляционных способностей наземных экосистем к связыванию выбросов различных загрязняющих веществ, в частности по интенсивности связывания наземными экосистемами антропогенного углерода и азота (Урусевская и др., 2020; Титлянова и др., 2018; Огуреева и др., 2020; Нестеренко, 2022; Кисельчук, Беспалова, 2022). Сложилось устойчивое представление о значении объектов тепловой энергетики в общих выбросах парниковых газов и о необходимости регулирования данного процесса (Тимурзиев, 2021).

В биогеографическом картографировании накоплен большой опыт по созданию различных карт, отображающих те или иные аспекты биоразнообразия, а картографический метод активно используется для изучения биоразнообразия на видовом и ценотическом уровнях (Титлянова, Базилевич, Снытко, 2018). Биомное деление биосферы на уровне крупных ее подразделений (зональных биомов) нашло отображение на ряде обзорных мелкомасштабных карт мира. Например, биогеографический обзор 35 равнинных биомов отображен на научно-справочной карте «Биомы России, в которой изложены концепции и подходы к классификации наземных экосистем и приводятся данные по биоразнообразию экосистем, флоре и фауне региональных биомов (Огуреева, Леонова, Булдакова и др., 2018).

На основе располагаемого материала могут решаться задачи вычисления количества образованного антропогенного углерода, углеродного следа от объектов тепловой энергетики и экологической оценки ассимиляционного потенциала наземных экосистем от выбросов антропогенного углерода.

В соответствии с методическими подходами к оценке составляющих углеродного баланса и на основании карты растительности, в Российской Федерации выделяется 10 основных типов биомов, каждый из которых имеет свои показатели углеродного баланса и продуктивности (табл. 1.6.1). Региональная распределенная оценка интенсивности накопления углерода в основных биомах России позволяет детализировать балансовые расчеты соотношения интенсивности выбросов антропогенного углерода для конкретных объектов

тепловой энергетики соответствующим особенностям наземных экосистем, в которых они расположены (Моисеев, Алябина, 2007).

Таблица 1.6.1. Основные показатели углеродного баланса в биомах России, млн. тонн С/год (Моисеев, Алябина, 2007)

Биомы	Площадь, млн га	Составляющие приходной части углеродного баланса*					Потери углерода*			Баланс C_{NBP}
		C_{NPP}	C_{NEP}	C_{Mort}	C_{Live}	C_{Fall}	C_{Rh}	C_{Leach}	C_{Loss}	
Полярные пустыни	2,6	0,1	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0,0
Тундра	235,9	109	26	19	7	101	83	4	2	22
Редкостойн. леса кустар.	172,1	143	69	33	36	107	77	2	4	63
Северная тайга	159,2	362	168	73	94	267	198	9	15	144
Средняя тайга	258,3	574	248	75	174	402	331	14	29	206
Южная тайга	194,5	555	129	26	103	453	549	9	33	86
Смешан. и листвен. леса	99,0	293	48	9	38	256	302	4	15	29
Луга, пастбища пашни	220,0	447	164	16	147	139	307	2	168	51
Болота	154,2	165	52	25	27	138	127	11	7	35
Прочие земли и водоемы	213,1	97	16	3	13	39	242	1	19	-4
Все биомы	1709,8	2745	919	280	639	1899	2215	56	291	631

* Примечание:

C_{NPP} – углерод чистой первичной продукции фитомассы;

C_{NEP} – чистая экосистемная продукция фитомассы;

C_{Fall} – годичный естественный опад листьев/хвои и отпад стеблей, ветвей и стволов;

C_{Live} – годичный прирост живой фитомассы в биомах;

C_{Rh} – гетеротрофное дыхание микроорганизмов / редуцентов (в данной работе — гетеротрофное дыхание почвы);

C_{Mort} – чистый годичный прирост мертвой фитомассы в экосистеме;

C_{Loss} – потери фитомассы в виде выноса урожая и потребления консументами;

C_{Leach} – потери органического вещества с суммарным стоком воды;

C_{NBP} – чистая биомная продукция фитомассы.

Чистая первичная продукция углерода C_{NPP} (т.е. ежегодно создаваемое растительное органическое вещество) во всех биомах России составляет 2745 млн. тонн С/год, определяется в основном климатическими факторами, однако, она во многом зависит от сукцессионного возраста экосистемы. Показатели первичной продукции углерода снижаются в случае деградации экосистемы. Как правило они выделяются на локальном уровне в промышленных районах.

Низкие удельные значения чистой первичной продукции углерода отмечаются в северной зоне, где много биомов в фазе климакса, а также в южных лесостепных и степных районах, где гетеротрофное дыхание почвы близко или превосходит значение C_{NPP} . Высокие удельные значения выявлены в таежной зоне в молодняках, а также в южных высокопродуктивных средневозрастных насаждениях.

В некоторых северных районах европейской территории страны, Сибири и на Камчатке отмечены довольно высокие значения экосистемной продукции. В условиях холодного климата скорость разложения фитомассы уступает скорости поступления растительного опада листьев/хвои и опада стеблей, ветвей и стволов, поэтому в северных биомах запас мертвой фитомассы может превосходить запас живой (Базилевич, 1993).

Суммарный углеродный баланс биомов – C_{NBP} положительный и составляет более 630 млн. тонн $C/год$. Наибольший вклад дают леса средней тайги – 206 млн. тонн $C/год$. В целом биомы лесов ежегодно накапливают 528 млн. тонн $C/год$. В зонах интенсивного сельскохозяйственного воздействия отмечены отрицательные значения углеродного баланса. Они особенно высоки (до 800 кг $C/га$ в год) в южных районах страны, что может объясняться целым рядом причин. Во-первых, потеря некоторой доли органического углерода экосистемами возможна в ходе перестройки их функционирования, например, в тундрах в процессе климатических изменений, а также в связи с их промышленным освоением. Имеются данные о возможной трансформации мерзлотных тундровых и лесных почв из накопителя углерода в источник углекислого газа в результате потепления климата (Jenkinson, Adams, D.E, 1991). Другой причиной отрицательных значений биомного баланса может быть деградация почв, характерная для южных регионов страны. Третьей причиной могут быть высокие потери фитомассы в результате пожаров, концентрированных рубок и других видов антропогенного воздействия.

Таким образом, ежегодное накопление углерода в растительном покрове страны в целом значительно превосходит эмиссию $C-CO_2$ в результате

гетеротрофного дыхания и потерь от внешних негативных воздействий. Чистый прирост углерода (биомный баланс) составляет более 630 млн. тонн С в год и перекрывает эмиссию С–СО₂ при производстве энергии в Российской Федерации. Однако на локальном уровне в отдельных регионах наземные экосистемы подвержены повышенной антропогенной нагрузке от деятельности объектов тепловой энергетики.

Для оценки углеродного следа от деятельности ТЭС производится сопоставление показателя количества выбросов СО₂ на производство электроэнергии. Для оценки растительного и почвенного пулов углерода в наземных экосистемах, рассчитываются запасы органического углерода в фитомассе и почвенном покрове на основе показателей запасов сухой фитомассы и запасов гумуса в почве.

Далее с учетом различий в скорости обновления растительного и почвенного пулов органического углерода наземных экосистем определяется усреднённый показатель годичного обновления углерода в фитомассе, который фактически представляет собой экологическую емкость наземных экосистем по углероду. Период обновления лесной фитомассы и почвенного гумуса может экспериментально уточняться для различных видов наземных экосистем.

Для экологической оценки ассимиляционного потенциала наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС, к поглощению антропогенного углерода, предлагается использовать индекс углеродной нагрузки, который фактически представляет собой балансовое соотношение поступающего в наземные экосистемы антропогенного углерода в дополнение к ежегодно обновляемому органическому углероду. Индекс углеродной нагрузки является важным агрегированным показателем, позволяющим оценивать ассимиляционные способности наземных экосистем к поглощению выбросов антропогенного углерода, что в свою очередь может быть использовано в качестве индикатора достижения углеродной нейтральности в границах определенной территории в целях реализации положений стратегии низкоуглеродного развития России.

1.7. Методологии оценки азотного следа объектов тепловой энергетики

Азот, как и углерод является важным биогенным элементом, необходимым для существования жизни на Земле, он входит в состав белков, аминокислот, нуклеиновых кислот, хлорофилла, гемов и др. Биогеохимический цикл азота имеет непосредственное влияние на состояние биоразнообразия. Сбой в какой-либо части круговорота азота может привести к нарушению его естественного баланса в наземных экосистемах, химическому загрязнению почв и соответственно дальнейшему распространению по пищевой цепи азотсодержащих веществ, губительных для живых организмов (Потапов, Крапивин, 2010). Значение проблемы по сохранению биологического разнообразия признана во всем мире и нашла свое отражение в Конвенции о биологическом разнообразии 1992 года.

Сохранение и восстановление природных систем, их биологического разнообразия и способности к саморегуляции заявлены как одно из стратегических целей государственной политики РФ в области экологии для устойчивого развития общества, повышения качества жизни, улучшения здоровья населения и демографической ситуации, обеспечения экологической безопасности страны (Экологическая доктрина Российской Федерации, 2002).

Азот присутствует в почве, воде, растительности, живых организмах в составе сложных веществ. Схема круговорота азота в природе условно может быть разделена на грунтовую и атмосферную части. Азот не фиксируется в организме в свободном виде. Поэтому в круговороте азота в природе помогают бактерии, синтезируя аммиак, азотную кислоту и нитраты. В составе солей азот попадает в растения и далее по пищевой цепочке в организмы травоядных и хищных животных. Новый цикл начинается при отмирании и разложении живых организмов. В атмосферу азот попадает в результате гниения или при горении органических веществ (Рамад, 1981).

Одним из основных антропогенных факторов, влияющих на азотный баланс в наземных экосистемах, являются выбросы оксидов азота от объектов тепловой энергетики образующиеся при сжигании углеводородного топлива. Выбросы (NO_x)

являются наиболее распространенными загрязняющими атмосферный воздух веществами, которым традиционно уделяется повышенное внимание в связи с их негативным воздействием на состояние биологического разнообразия. На фоне глобального изменения климата изменяется экологическая продуктивность наземных экосистем и увеличивается опасность исчезновения некоторых уязвимых видов животных и растений. Необходимо системное рассмотрение вопроса поступления в наземные экосистемы антропогенного азота в контексте с уровнем интенсивности выбросов NO_x от объектов тепловой энергетики с учетом региональных особенностей наземных экосистем. Поэтому важно уточнить закономерности влияния широтной зональности на ассимиляционные способности наземных экосистем.

Следует отметить, что гостированного определения понятия «азотный след» в России еще нет, однако в последние годы вопросы нормирования выбросов антропогенного азота и влияние на биоразнообразие биоценозов в наземных экосистемах обрели большую актуальность в мире, особенно в Европейских странах и Китае (Li Yifei et al., 2023; Zuliani et al., 2023; Кудеяров, 2018). 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 единицах NO_2 , образующихся при производстве 1 кВтч электроэнергии (Артамонов, Гутников, Васенев, 2022).

Устойчивость наземных экосистем, как и способность к поглощению выбросов NO_x определяется биологической продуктивностью и биоразнообразием, которые в свою очередь зависят от физико-географических и климатических особенностей территории, а также уровня деградации экосистем. Поэтому восстановление естественных природных экосистем является приоритетной задачей в вопросах сохранения биоразнообразия (Белик и др., 2013).

В отсутствие недопустимого воздействия хозяйственной деятельности человека на экосистемы локально повышенное поступление азота в наземные экосистемы сопровождается ростом их биологической продуктивности при

отсутствии риска загрязнения почв и биоты. Основные удельные показатели азотного баланса характеризуются выраженной зональной дифференциацией наземных экосистем и биомов (табл. 1.7.1).

Таблица 1.7.1. Основные показатели азотного баланса в биомах России, кг N/га в год (Моисеев, Алябина, 2007)

Биомы	Площадь, млн. га	N _{NPP}	Входные потоки		Выходные потоки			Баланс N _{bal}	C/N
			N _{dep}	N _{fix}	N _{Leach}	N _{den}	N _{loss}		
Полярные пустыни	2,6	1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	100
Тундра	235,6	3,6	1,5	0,3	0,6	0,5	0,2	0,5	97
Редкостойн. леса, кустар.	172,1	10	2,3	0,5	1,0	0,7	0,3	0,8	83
Северная тайга	159,2	10,8	2,3	0,6	1,5	0,7	0,4	0,3	83
Средняя тайга	258,3	26,3	3,2	1,0	1,4	1,0	1,4	0,4	80
Южная тайга	194,5	36,7	5,0	1,3	1,5	1,5	2,2	1,1	80
Смешан. и листвен. леса	99	38	7,4	1,9	1,6	2,3	1,9	3,5	78
Луга, пастбища, пашни	220	41,1	4,9	0,9	0,9	1,5	15,4	-12,0	49
Болота	154,2	11,6	133,0	0,5	2,1	0,9	0,5	0,0	93
Прочие земли и водоемы	213,1	6,7	233,7	0,7	0,6	1,2	1,3	1,3	66
Все биомы	1709,8	18,1	31,2	0,8	1,2	1,0	2,0	-0,2	88

* N_{NPP} – содержание азота в чистой первичной продукции;

N_{dep} – выпадения соединений азота из атмосферы на поверхность почвы с сухими и влажными осадками;

N_{fix} – фиксация азота в ходе усвоения молекулярного азота атмосферы и построения из него азотистых соединений микроорганизмами почвы;

N_{leach} – выщелачивание из почвы соединений азота с суммарным стоком воды;

N_{den} – денитрификация в процессе дыхания микроорганизмов почвы;

N_{loss} – потери азота в результате пожаров, рубок, выноса с урожаем и пр.

Валовое содержание азота в почве различается в зависимости от типа почв, например, в черноземах может достигать более 10 тонн азота на 1 га. Однако почти 99 % его связано в органических соединениях, в том числе и в гумусе, поэтому он недоступен для растений и обычно выступает в качестве основного лимитирующего фактора их роста. Аммонийные и нитратные формы соединений азота ассимилируются растениями и микроорганизмами. Запасенные в почве соединения азота служат компенсирующей базой для внутреннего и внешнего циклов азота (Яшин и др., 2012).

В чистой первичной продукции содержится около 31 млн. тонн азота при этом среднее соотношение C/N в биомах составляет 88. Отмечено закономерное

возрастание показателя C/N с юга на север (от 49 до 100). Чем выше температура окружающей среды, тем быстрее происходит деструкция мортмассы, тем меньше соотношение C/N. Для чистой первичной продукции содержание азота наиболее высокое в фитомассе лугов и пастбищ (вместе с северными лугами среднее содержание азота составляет 41,1 кг N/га в год, а показатель C/N равен 49).

Наибольшая плотность выпадений азота с осадками достигает 30 кг N/га в год и отмечена в местах скопления промышленных предприятий и ТЭС. Средние удельные значения фиксации азота не превышают 3 кг/га в год, их наибольшие величины наблюдаются, в основном, в южных районах страны с преобладанием плодородных почв.

Наибольшие отрицательные значения азотного баланса отмечены в районах интенсивного сельскохозяйственного освоения. Обширные районы отрицательных значений баланса выделены также в лесной зоне европейской территории России и Центральной Сибири, где распространены лесные пожары и концентрированные рубки.

Следует отметить, что изучение массообмена азота почв связано с большими трудностями, поэтому количественные оценки баланса и отдельных миграционных потоков азота, выполненные разными исследователями на разных уровнях детализации, сильно различаются (Ковда, 1987).

Атмосферные выпадения соединений азота наиболее опасны в северных районах Западной Сибири и в районе Норильска. Здесь возможно эвтрофирование тундровых и водных экосистем (Фирсова и др., 1990).

Наибольшие потери органического азота происходят в биомах с преобладанием землепользования сельскохозяйственного направления, удаленных от промышленных центров, где атмосферные выпадения азота на уровне фоновых, а также в лесных биомах, подверженных пожарам и экстенсивным рубкам.

Расширенный баланс экосистем в условиях значительной лесистости территории позволяет обеспечить повышенную буферность наземных экосистем в зоне негативного антропогенного воздействия. Расчет содержания азота в древесных растениях с учитывающий возраст древостоя, запас первого яруса, запас

второго яруса, полноту первого яруса и тип древесной растительности для площади зон непосредственного воздействия (Карпачевский, 2009 и 2012).

Величина прироста органического вещества растительности зависит от гидротермического режима территории, характеризуемого климатическими индексами. На величину прироста органического вещества растительности также влияет очень большое число внутренних и внешних факторов: биологические особенности древесных пород, слагающих древостой, его происхождение, исходная таксационная характеристика, качество условий местопроизрастания (класс бонитета, тип леса), режим выращивания и др. (Глазовский, 2006; Климова и др., 2019; Карпачевский и др., 2009; Henry et al., 2013; Picard et al., 2012; Baldasso et al., 2012; Zianis et al., 2005; Mart-Jan Schelhaas et al., 2018).

Параметризация модели прироста биомассы древостоев определяется через кривые хода роста по бонитетам, аллометрические уравнения для расчета биомассы, аллокации NPP по органам дерева, содержание азота в биомассе и органах дерева. Составления таблиц хода роста по методу ЦНИИЛХ базируется на использовании для решения задачи закономерностей в росте и строении древостоев (Швиденко и др., 2006).

Составления таблиц хода роста осуществляют на основе выборочно-статистического метода Анучина (1982), а также метода подбора типов роста Загреева и Антанайтис (1987, 1981), который базируется на использовании системы типовых моделей роста, построенных на основе выявленных общих закономерностей по породам и отдельным таксационным показателям. Классификационными признаками таблиц хода роста могут быть как тип леса, так и класс бонитета. В последнем случае класс бонитета для всего ряда развития устанавливается по указательному (самому старшему в ряду) древостою. В качестве таксационных характеристик анализируется высота (H, м) и диаметр (D, см) (Козловский, Павлов, 1967).

Очень важно изучать и контролировать круговорот азота, особенно в антропогенных биоценозах, потому что небольшой сбой в какой-либо части цикла может привести к серьёзным последствиям: сильным химическим загрязнениям

почв, зарастанию водоемов и загрязнению их продуктами разложения отмершей органики (аммиак, амины и др.), высокому содержанию растворимых соединений азота в питьевой воде.

Для расчета показателя азотного следа от деятельности ТЭС производится сопоставление показателя количества выбросов NO_2 на показатель производства электроэнергии. Для оценки растительного и почвенного пулов азота в наземных экосистемах, расположенных в зоне непосредственного воздействия ТЭС, рассчитываются запасы органического азота в фитомассе и почвенном покрове с учетом значений соотношения азота к органическому углероду (N:C) характерных для основных видов биомов.

Далее, как и в случае с органическим углеродом, производится расчёт усреднённого показателя годичного обновления азота в фитомассе и почвенном покрове, который фактически представляет собой экологическую емкость наземных экосистем по азоту. Период обновления лесной фитомассы и почвенного гумуса может экспериментально уточняться для различных видов наземных экосистем.

Для экологической оценки ассимиляционного потенциала наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС, к поглощению антропогенного азота, предлагается использовать индекс азотной нагрузки, который фактически представляет собой балансовое соотношение поступающего в наземные экосистемы антропогенного азота в дополнение к ежегодно обновляемому органическому азоту. Индекс азотной нагрузки является важным агрегированным показателем, позволяющим оценивать ассимиляционные способности наземных экосистем к поглощению выбросов антропогенного азота. В перспективе, индекс азотной нагрузки может быть сопоставлен с нормативным значением модуля азотной нагрузки.

1.8. Энергетический комплекс Москвы

Дополнительно в работе проводится экологическая оценка углеродного и азотного следа объектов тепловой энергетики в условиях г. Москвы.

Энергетический комплекс Москвы является одним из крупнейших в России, в него входят 16 крупных объектов тепловой энергетики (Рис. 1.8.1).

Энергосистема Москвы неразрывно связана с электроэнергетическими системами Московской области и всего Центрального региона (ОЭС Центра). Внешние электрические связи 500 и 750 кВ позволяют осуществлять прием мощности со стороны Конаковской, Костромской, Рязанской ГРЭС и других электростанций ОЭС Центра. Электроснабжение города Москвы осуществляется от 145 центров питания, в том числе: от шин генераторного напряжения пятнадцати электростанций, тридцати двух подстанций (ПС) 220 кВ и восьмидесяти восьми ПС 110 кВ, расположенных на территории города (всего 135 ЦП), девяти ПС 110 кВ и от шин генераторного напряжения одной ТЭЦ, расположенных за территорией города (Энергетическая стратегия города Москвы на период до 2025, 2008).

Московское энергетическое кольцо включает в себя систему мощных подстанций класса 500 киловольт вокруг столицы и соединяющих их линий электропередачи, предназначенных для приема и распределения электроэнергии, а именно: Чагино, Очаково, ОРУ ТЭЦ-26, Бескудниково, Белый Раст, Ногинск, Трубино, Западная, Каскадная и Пахра.

В связи с расширением в 2012 году территории Москвы произошла актуализация документов энергетического развития, определяющих стратегию и единую техническую политику перспективного развития систем электроснабжения и теплоснабжения города, в том числе на территории Троицкого и Новомосковского административных округов. Так, площадь г. Москвы составляет 2561,5 км² (0,015 % от показателя по РФ), на которой проживает 13097 тыс. человек (8,9 % от показателя по РФ).

В соответствии с Законами города Москвы от 05.07.1995 № 13-47 «О территориальном делении города Москвы» и от 08.10.1997 № 40-70 «О наименовании территориальных единиц, улиц и станций метрополитена города Москвы» в состав Москвы входит 12 административных округов, 125 районов и 21 поселение.

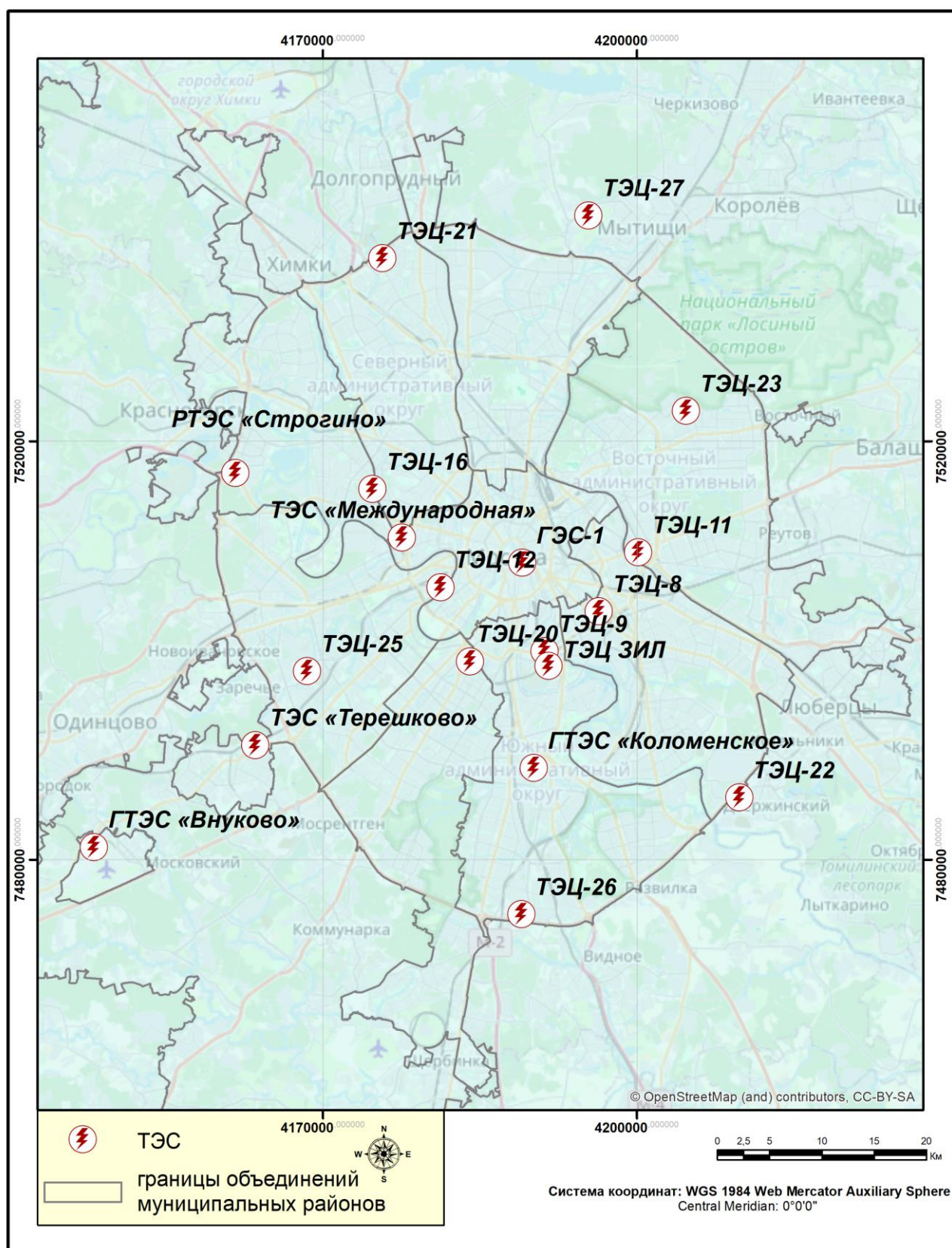


Рисунок 1.8.1. Расположение московских ТЭЦ

Наибольшими по площади являются новоприсоединенные территории новой Москвы – НАО и ТАО, при этом на этих территориях отсутствуют генерирующие объекты федерального значения. По показателю численности населения лидирует ЮАО. Наиболее плотно заселенными являются СВАО, ЮАО и ЮЗАО. НАО и ТАО сильно уступают другим по показателям численности и плотности населения. Наиболее масштабная деятельность объектов энергетики в ЮАО, ВАО и ЗАО. Показатель коэффициента установленной используемой мощности показал значение более 60 % только в СЗАО и СВАО. Наибольшие показатели расхода топлива (природный газ) на объектах тепловой энергетики в ЮАО и ЗАО. Наибольшие значения выбросов NO_x выявлены также в ЮВАО. По выбросам CO_2 наибольшие показатели выявлены в ЗАО (табл. 1.8.1).

Дефицит электрических мощностей в некоторых районах Москвы, монотопливный баланс и снижение энергетической безопасности и надежности энергоснабжения потребителей, нерешенность проблемы газоснабжения, снижение технической и экономической эффективности энергетических объектов, высокое удельное потребление топлива, более быстрый по сравнению с прогнозируемым рост численности населения и интенсивное строительство новых объектов на территории города – все эти проблемы обозначены как основные в энергетической стратегии Москвы на период до 2025 года. Для обеспечения дальнейшего экономического роста города в условиях увеличения численности населения и осуществления цифровой трансформации городского хозяйства требуется увеличение потребления электроэнергии при условии снижения воздействия на окружающую среду (Артамонов, 2015).

Российская Федерация ведет активную работу по достижению целей устойчивого развития, принятых Генассамблеей ООН. Так, например, концепция «Умный город – 2030», являющаяся неотъемлемой частью идеологии устойчивого развития общества и разработанная специально для Москвы определяет приоритеты, цели и задачи государственного управления и развития в сфере цифровых технологий города до 2030 года.

Еще одним из трендов развития умных городов является повышение экологичности производственной деятельности с целью предотвращения негативного воздействия на экосистемы, обеспечения устойчивости биосферы и охраны окружающей среды.

Предусматривается создание экологических информационных систем для:

- улучшения экологической ситуации в городе;
- прогнозирования развития экологической обстановки;
- повышения эффективности использования природных ресурсов;
- сокращения выбросов углекислого газа в атмосферу;
- адаптации к климатическим изменениям.

Одним из основных показателей для направления «Безопасность и Экология» в концепции «Умный город – 2030» определен: совокупный объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Для объективной экологической оценки современного состояния города по объему выбросов загрязняющих веществ в соответствии с концепцией «Умный город – 2030» должна быть решена задача модернизации систем мониторинга экологической ситуации с применением передовых цифровых технологий. Речь идет о создании информационной системы, позволяющей повысить качество анализа городской экосистемы и способствовать сокращению объемов выбросов (Artamonov et al., 2020).

Москва является своеобразным ориентиром современного развития для всех остальных городов России. Энергетический комплекс Москвы считается одним из самых экологически чистых по России: доля природного газа в топливном балансе города приближается к 100 %. Московские генерирующие компании ежегодно осуществляют ввод в эксплуатацию новые парогазовые энергоблоки, которые позволяют снизить объем потребления природного газа и соответственно выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ.

1.9. Актуальные задачи экологической оценки углеродного и азотного следа в энергетике

Вопросы климатических изменений и регулирования выбросов парниковых газов за последнее десятилетие вышли в мире на новый уровень. Проведенный анализ зарубежных и отечественных источников литературы показал, что общее ускоренное развитие региональных климатических изменений продемонстрировано материалами МГЭИК, ЮНЕП ООН, ВМО, а также данными национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2020 гг.

Подтверждены лидирующие позиции энергетической отрасли, как являющейся одним из определяющих факторов нарастания объема парниковых газов в атмосфере. Определился новый мировой тренд по достижению углеродной нейтральности территории (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. Инструментом решения данных задач является разработка различных систем верификации расчетов углеродного и азотного следа (Уткин и др., 2006 и 2021).

В работах И.О. Алябиной, Н.И. Базилевич, Г.В. Добровольского, Л.О. Карпачевского, В.Н. Кудеярова, В.А. Ковды, Г.Н. Огуревой и др. рассмотрены общие подходы для анализа климатических изменений, состояния наземных экосистем, их устойчивости к различным видам антропогенного воздействия. Изложенные подходы требуют адаптации под задачи исследования, касающиеся экологической оценки углеродного и азотного следа с анализом ассимиляционных способностей наземных экосистем к поглощению антропогенного углерода и азота.

Инструментом решения данных задач является разработка различных систем верификации расчетов углеродного и азотного следа. На основе стратегии

низкоуглеродного развития России поставлены и приняты целевые задачи данного исследования, а именно:

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

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

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

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

- 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.

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

Обобщение информации об ассимиляционных способностях различных видов наземных экосистем к поглощению выбросов антропогенного углерода и азота представляются актуальными задачами социально-экологического развития субъектов РФ. Научное значение данного исследования обусловлено возрастающей потребностью в систематическом анализе, охватывающем экосистемное разнообразие территории страны для обеспечения выполнения сценариев стратегии низкоуглеродного развития России и сохранения экосистемного и биологического разнообразия. Задача заключается в систематизации информации об ассимиляционном потенциале наземных экосистем, находящихся в зоне воздействия ТЭС с описанием характеристик, присущих определенным группам объектов энергетики.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для создания наблюдательных систем и моделей для мониторинга достижения углеродной нейтральности территории. Внедрение современных методов моделирования, прогнозирования, индикативного планирования, балансовых расчетов и информационных технологий также являются основными направлениями государственной политики в сфере стратегического планирования (Указ Президента РФ от 08.11.2021 № 633).

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Характеристика региона исследования

Региональные типологические особенности развития, функционирования и воздействия объектов тепловой энергетики на окружающую среду в Российской Федерации определяются физико-географическими и природно-климатическими особенностями конкретных регионов страны, уровнем урбанизации, а также масштабами развития промышленности.

Экосистемное разнообразие страны, отличающееся своей пространственной неоднородностью (от арктических пустынь, постоянно покрытых снегом до степей, покрытых в основном травянистой растительностью) обусловлено огромной площадью Российской Федерации в 17,125 млн. км² и большой протяженностью территории в меридиональном направлении 2,5 – 4,0 тыс. км, в широтном – 9,0 тыс. км. На более чем 67 % площади территории России распространена вечная мерзлота, лесной фонд занимает более половины площади страны, кроме того, более 60 % площади России представлено ненарушенными и слабонарушенными наземными экосистемами, сохраняющими естественные местообитания растений и животных. На территории страны имеется 296 особо охраняемых территорий федерального значения (ООПТ), в том числе 103 государственных природных заповедников, 49 национальных парков и 59 государственных природных заказников, а также 17 памятников природы. Общая площадь ООПТ федерального значения составляет 62,4 млн га (с учётом морских акваторий) или 48,2 млн га (без акваторий) (Национальный атлас России, 2008).

Климат России отличается значительным разнообразием при преобладании умеренного климата, также имеются территории, расположенные в арктическом, субарктическом и субтропическом климатических поясах (Алисов, Полтараус, 1974).

Плотность населения в субъектах РФ колеблется от 0,1 чел. на км² до 4,9 тыс. чел. на км². В зоне европейской части России, занимающей всего 1/3 территории страны, сосредоточена наибольшая часть населения, но при этом уровень

урбанизации составляет около 75 %. Важно отметить, что в России выделяется 11 часовых поясов (Федеральный закон от 03.06.2011 № 107-ФЗ).

Все вышеизложенные факты значительным образом оказывают влияние на режимы работы объектов тепловой энергетики. Экономические и демографические факторы также оказывают влияние на величину и структуру антропогенных выбросов в атмосферу парниковых газов и других загрязняющих веществ.

Ландшафтная карта России масштаба 1:20000000, подготовленная под редакцией А.Г. Исаченко содержит 61 тип зонально-секторных групп ландшафтов и 37 видовых (азональных) групп ландшафтов (рис. 2.1.1). В зону непосредственного воздействия исследуемых ТЭС входят наземные экосистемы общей площадью 37 236 га, представленные 206 различными типами экосистем, для которых характерны 84 типа почв по отечественной классификации (Фридланд, 1988) или 37 типов почв по классификации мировой реферативной базы почвенных ресурсов World Reference Base for Soil Resources (WRB), которая является международным стандартом таксономической иерархии почв, принятым Международным союзом наук о почве (IUSS). База была разработана в рамках международного сотрудничества, координируемого Международным центром по почвенным исследованиям и информации (ISRIC) под эгидой IUSS и ФАО.

В регионах проведенных исследований представлен широкий зональный ряд представительных типов почв в соответствии с классификацией WRB 2006 (табл. 2.1.1 и рис. 2.1.2).

Системный анализ экосистемного разнообразия территории Российской Федерации является инструментом стратегического планирования и территориального развития субъектов РФ в целях достижения к 2060 году углеродной нейтральности территории при устойчивом росте экономики, предусмотренной стратегией углеродного развития России, а также инструментом для экологической оценки состояния экосистемного и биологического разнообразия, в целях выполнения обязательств предусмотренных Конвенцией о биологическом разнообразии 1992 года.

**Таблица 2.1.1. Представительные типы почв и их основные характеристики
(Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, 2014)**

Название почв в системе WRB, 2006	Код (WRB, 2006)	Типичное строение профиля	Среднее соотношение C/N в почвах
Fibric Histosols Dystric	1-1	O1—O2—O3—Cg	12
Turbic Cryosols Dystric	4-1	O3—Gd—G	16
Histic Cryosols Reductaquic	4-2	O3—Gd	12
Calcic Cryosols Eutric	4-5	O3—Bpca—BCcap—Ccap	16
Lithic Leptosols Brunic	5-1	O—Bh,p—Cp	12
Rendzic Leptosols Eutric	5-2	O—AO—A1pca—Bcap—Ccap—Dca	12
Mollic Leptosols Eutric	5-3	A1p—Bp—Bcap—BCcap—Ccap	11
Umbric Fluvisols Oxyaquic	7-5	A1—B1—Bg—CDg	12
Haplic Fluvisols Oxyaquic	7-6	A1—AB—B—BC—D	12
Haplic Solonetz Albic	8-2	A1A2—B—Bca(s)—(Bcs)—(Bs)—Cs	15
Histic Gleysols Dystric	10-2	O—G—(1G)	15
Endosalic Gleysols Sodic	10-3	A1—Bg	17
Alic Gleysols Dystric	10-4	O—GA2—Bg(G)—G(C).	12
Haplic Gleysols Humic	10-6	O—O3—A1(g,n)—Bg,(n)—C(g)(G2)	12
Aluandic Andosols Dystric	11-1	AO—AOA1—A2—AB—B—BC—D	12
Carbic Podzols	12-1	O—AO—A2—Bf(Bh,f)—C	12
Rustic Podzols	12-2	O—AO—A2—Bf,h(Bh)—C	16
Histic Podzols	12-5	O1—A2—Bh—Cg	13
Andic Podzols	12-6	O—AO—A2—Bf,h(Bh)—C	12
Luvic Planosols Eutric	16-1	A1—A2(A1A2)—Bt,(g)—Bca,(g)—Cg	12
Luvic Stagnosols Dystric	17-1	O—A2gh—Bt—BtC—C	19
Voronic Chernozems pachic	18-1	A1—A1Bca—Bca—BCca—Cca	12
Luvic Chernozems Sodic	18-4	A1—A1B—Bt—Bca—BCca—Cca	11
Haplic Chernozems Pachic	18-5	A1—A1B(ca)—Bca—Cca	10
Endosalic Kastanozems Chromic	19-2	A1(ca)—A1Bca—Cca	6
Haplic Kastanozems Chromic	19-3	A1—B—Bca—Bcs—Ccs	11
Greyic Phaeozems Albic	20-1	A1—AB(A1A2)—Bt—BtC—Cca(C)	12
Luvic Phaeozems Albic	20-3	A1—A1B—Bt—Bca—BCca—Cca	11
Histic Albeluvisols Abruptic	24-1	O1—A2g,n—Bt,g,n—G2	12
Gleyic Albeluvisols Abruptic	24-2	A1v—A1—A2g,n—Btg—G2	12
Umbric Albeluvisols Abruptic	24-3	O—AO—A1—A2—A2/Bt—Bt—BtC—C	17
Haplic Albeluvisols Abruptic	24-4	O—A2—B—Bt—C	14
Albic Luvisols Abruptic	27-1	A1—A2—Bt,fe,(n),(g)—BCfe(g)—Cfe(g)	12
Haplic Umbrisols Hyperdystric	29-1	O—A1—Bm—C	12
Rubic Arenosols Eutric	30-1	O—AO—AB—C	8
Haplic Arenosols Eutric	30-2	A1—A1B—C	12
Haplic Cambisols Dystric	31-2	O1—AO—A1(A1A2)—Bm—BmC—C	12



Рисунок 2.1.2. Почвы и почвенные комплексы (Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году»)

2.2. Объекты исследования

Объектами диссертационного исследования являются 356 объектов тепловой энергетики разного назначения (ГРЭС, ТЭЦ, промышленные ТЭС и ДЭС), размещенные на территории Российской Федерации. В соответствии с ГОСТ 19431-84 под тепловой электростанцией (ТЭС) понимается электростанция, преобразующая химическую энергию топлива в электрическую энергию или электрическую энергию и тепло. Тепловые электростанции составляют основу генерирующих мощностей России и имеют стратегическое значение в социально-экономическом развитии субъектов РФ. ГРЭС вырабатывают в основном электрическую энергию и, как правило, являются градообразующими предприятиями. ТЭЦ работают в режиме когенерации, вырабатывают электрическую и тепловую энергию, чаще всего расположены в крупных городах. Промышленные ТЭС входят в состав производственных предприятий и предназначены для энергоснабжения этих предприятий. ДЭС применяются в качестве резервных или аварийных источников электроэнергии малой мощности.

Предметом диссертационного исследования является экологическая оценка уровня воздействия объектов тепловой энергетики на наземные экосистемы в части выбросов оксидов углерода и азота с анализом ассимиляционного потенциала наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС, к поглощению антропогенного углерода и азота в различных регионах России.

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 %. Исследуемые ТЭС находятся во владении 107 хозяйствующих субъектов (Табл. 2.2.1).

Таблица 2.2.1. Хозяйствующие субъекты и находящиеся в их владении объекты тепловой энергетики

№	Хозяйствующий субъект	Кол-во ТЭС	Мощность, МВт	Площадь зоны воздействия, га	Тип экосистем по И.С. Гудилину*
1	АО «АМО ЗИЛ»	ТЭЦ (1)	125	36	133с
2	АО «Архангельский ЦБК»	Пром.(1)	188	82	112а
3	АО «Бийскэнерго»	ТЭЦ (1)	535	135	259а
4	АО «Ванкорнефть»	Пром.(1)	200	33	038а
5	АО «Волга»	ГРЭС (1)	112	68	131в
6	АО «Группа «Илим»	Пром.(2)	418	113	112а, 184а
7	АО «ГСР ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	110	34	125а
8	АО «ГТ Энерго»	ТЭЦ (1) Пром.(1)	72	60	125г, 233р
9	АО «ДВЭУК»	ТЭЦ (1)	33	30	935л
10	АО «ДГК»	ГРЭС (5) ТЭЦ (13)	5934	2234	589д, 653б, 663а, 668а, 669а, 671в, 672д, 699о, 924а, 924в, 927а, 935и
11	АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	ТЭЦ (1)	600	121	802в
12	АО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК»	ТЭЦ (1)	50	34	515б
13	АО «ЕВРАЗ НТМК»	Пром.(1)	149	79	556г
14	АО «Енисейская ТГК (ТГК-13)»	ТЭЦ (1)	406	166	804а
15	АО «ИНТЕР РАО - Электрогенерация»	ГРЭС (15) ТЭЦ (6)	23759	3759	090а, 091а, 101б, 122в, 123ж, 125а, 130а, 142г, 162а, 222а, 224а, 523а, 784а, 800а, 804а, 883а, 892а, 937б
16	АО «КрымТЭЦ»	ТЭЦ (3)	157	121	247г, 252а, 950д
17	АО «Кузнецкая ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	108	182	802в
18	АО «Монди СЛПК»	Пром.(1)	541	87	112б
19	АО «Миасский машиностроительный завод»	ТЭЦ (1)	45	43	548б
20	АО «НДЭС»	ДЭС (1)	5	3	755б
21	АО «НИКИМТ-Атомстрой»	ТЭЦ (1)	549	158	172в
22	АО «НПК «Уралвагонзавод»	Пром.(1)	128	60	556г
23	АО «Охинская» ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	99	42	659а
24	АО «Паужетская ГеоЭС»	ДЭС (1)	2	3	761а
25	АО «РУСАЛ Ачинск»	ТЭЦ (1)	440	89	050а
26	АО «Саровская Генерирующая Компания»	ТЭЦ (1)	72	58	134ш
27	АО «Сахаэнерго»	ДЭС (1)	10	4	056а
28	«Сахалин Энерджи»	Пром.(1)	129	245	725а
29	АО «Сибирская энергетическая компания»	ТЭЦ (5)	2518	604	259е, 261д, 798а, 798б
30	АО «Татэнерго»	ГРЭС (1) ТЭЦ (4)	3790	486	131в, 137з, 222б, 227к, 234е
31	АО «ТГК-11»	ТЭЦ (4)	1530	438	259е, 261к, 270г
32	АО «Томская генерация»	ГРЭС (1) ТЭЦ (2)	486	277	162д, 163и, 521а
33	АО «Уральская Сталь»	ТЭЦ (1)	172	115	810а
34	АО «ФосАгро - Череповец»	Пром.(1)	102	39	125в
35	АО «Чукотэнерго»	ГРЭС (1) ТЭЦ (3)	138	140	428б, 475а, 476а
36	АО «Юго- Западная ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	507	52	125а
37	АО «Янтарьэнерго»	ГРЭС (1)	21	56	090а
38	ГК «ТАИФ»	ТЭЦ (2)	1300	235	131в, 227к
39	ГУП «ПЭО Байконурэнерго»	Пром.(1)	48	63	318в
40	ЗАО «ТГК Урусинская ГРЭС»	ГРЭС (1)	161	50	222б

№	Хозяйствующий субъект	Кол-во ТЭС	Мощность, МВт	Площадь зоны воздействия, га	Тип экосистем по И.С. Гудилину*
41	КП «МЭД»	ТЭЦ (1)	90	32	133с
42	МУП «Шарьинская ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	21	15	124м
43	ОАО «Щекиноазот»	ТЭЦ (1)	105	78	227г
44	ОК «РУСАЛ»	ТЭЦ (1)	135	112	534а
45	ООО «Автозаводская ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	580	45	222а
46	ООО «Башкирская генерирующая компания»	ГРЭС (1) ТЭЦ (10)	4349	883	139г, 227п, 228е, 235с, 247ж
47	ООО «ВО «Технопромэкспорт»	ТЭЦ (2)	940	152	950д, 952г
48	ООО «Воркутинские ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	270	102	028и
49	ООО «ВТК-инвест»	ТЭЦ (1)	136	30	133с
50	ООО «Дорогобужская ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	128	82	133ж
51	ООО «ЗЭМЗ»	Пром.(1)	191	37	515в
52	ООО «Интертехэлектро – Новая генерация»	ТЭЦ (1)	225	44	259е
53	ООО «Котовская ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	80	52	134щ
54	ООО «ЛУКОЙЛ-Астраханьэнерго»	ГРЭС (1) ТЭЦ (3)	842	198	305в
55	ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго»	ГРЭС (1) ТЭЦ (5)	1367	501	256б, 257в, 290в, 291е
56	ООО «ЛУКОЙЛ-Коми»	ТЭЦ (2)	175	128	042г, 115з
57	ООО «ЛУКОЙЛ-Кубаньэнерго»	ТЭЦ (1)	1091	108	239е
58	ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез»	Пром.(1)	200	34	139в
59	ООО «ЛУКОЙЛ-Ростовэнерго»	ТЭЦ (2)	580	135	244ю, 255о
60	ООО «ЛУКОЙЛ-Ставропольэнерго»	ТЭЦ (2)	165	71	255л, 781б
61	ООО «Мечел-Энерго»	Пром.(1)	229	54	800б
62	ООО «Нижекамская ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	380	122	227к
63	ООО «Ново-Рязанская ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	425	104	223г
64	ООО «Ново-Салаватская ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	530	100	247ж
65	ООО «Ноябрьская ПГЭ»	Пром.(1)	119	33	145в
66	ООО «РН-Туапсинский НПЗ»	Пром.(1)	153	33	937б
67	ООО «РН-Юганскнефтегаз»	Пром.(1)	393	67	152в
68	ООО «Росмикс»	ТЭЦ (1)	170	33	133с
69	ООО «СГС ПЛЮС»	ТЭЦ (1)	33	33	780г
70	ООО «Сибирская генерирующая компания»	ГРЭС (4) ТЭЦ (11)	7338	2746	175а, 263а, 276е, 556к, 799б, 799в, 802в, 811а, 915в
71	ООО «Ситиэнерго»	ТЭЦ (1)	236	33	134д
72	ООО «Соликамская ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	144	73	115к
73	ООО «Тверская генерация»	ТЭЦ (2)	258	131	131а
74	ООО «Хуадянь-Тенинская ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	450	51	123д
75	ООО «Центральная ТЭЦ»	ТЭЦ (1)	100	129	535а
76	ООО «Шахтинская ГТЭС»	ТЭЦ (1)	100	48	244ю
77	ООО «Щекинская ГРЭС»	ГРЭС (1)	400	60	227г
78	ООО «Юргинский машзавод»	Пром.(1)	91	151	261к
79	ПАО «Интер РАО»	ТЭЦ (1)	160	49	095а
80	ПАО «Иркутскэнерго»	ТЭЦ (8)	3916	1144	172а, 172б, 184а, 172б, 184а
81	ПАО «Камчатскэнерго»	ТЭЦ (2)	392	100	751ж
82	ПАО «Квадра»	ГРЭС (1) ТЭЦ (18)	2876	1103	133ж, 134ц, 222а, 223г, 226г, 227г, 231д, 232а, 232д, 233у, 233р, 233с, 234а, 234б, 234в
83	ПАО «Курганская генерирующая компания»	ТЭЦ (1)	450	143	259е
84	ПАО «Магаданэнерго»	ГРЭС (1) ТЭЦ (1)	320	166	404г, 651а
85	ПАО «Магнитогорский МК»	ТЭЦ (1) Пром.(1)	491	179	799г
86	ПАО «Мечел»	ГРЭС (1)	554	114	556т

№	Хозяйствующий субъект	Кол-во ТЭС	Мощность, МВт	Площадь зоны воздействия, га	Тип экосистем по И.С. Гудилину*
87	ПАО «Мосэнерго»	ГРЭС (1) ТЭЦ (14)	13332	1393	131г, 132б, 133е, 133с, 134д, 135м
88	ПАО «МОЭК»	ТЭЦ (1)	130	34	133е
89	ПАО «НЛМК»	Пром.(3)	682	243	232а, 259а
90	ПАО «НТЭК»	ТЭЦ (2)	795	101	042а
91	ПАО «НПК ОВК»	ТЭЦ (1)	109	48	125а
92	ПАО «ОГК-2»	ГРЭС (10) ТЭЦ (2)	18953	3512	122а, 123л, 125а, 142р, 159б, 185б, 223г, 239б, 245з, 245к, 267е, 937б
93	ПАО «ППГХО»	Пром.(1)	410	157	883а
94	ПАО «РусГидро»	ТЭЦ (1)	126	71,4	688а
95	ПАО «Сахалинэнерго»	ГРЭС (2) ТЭЦ (1)	659	187	720а, 741б, 743а
96	ПАО «Северсталь»	Пром.(2)	471	150	125в
97	ПАО «Сургутнефтегаз»	Пром.(1)	144	40	205г
98	ПАО «Т Плюс»	ГРЭС (3) ТЭЦ (47) Пром.(1)	15759	4770	042ж, 115в, 120в, 124ж, 124с, 127в, 129а, 131в, 134ю, 137л, 137м, 139в, 177г, 222а, 226е, 227а, 230а, 230д, 231л, 233х, 234д, 235е, 240г, 247б, 247е, 251б, 518б, 523а, 524а, 810а
99	ПАО «ТГК-1»	ТЭЦ (12) ДЭС (1)	4220	907	037а, 053а, 115а, 116а, 125а, 128б
100	ПАО «ТГК-14»	ТЭЦ (7)	648	756	610а, 619г, 634д, 634е, 882г, 885а, 891а
101	ПАО «ТГК-2»	ТЭЦ (11)	2390	696	101а, 105а, 116б, 120б, 123ж, 125г
102	ПАО «Тулачермет»	Пром.(1)	101	93	227г
103	ПАО «Фортум»	ГРЭС (2) ТЭЦ (7)	5416	1215	163ж, 172в, 172г, 267е, 524б, 800б, 152в
104	ПАО «Энел Россия»	ГРЭС (4)	9506	862	131а, 239в, 522а, 523а
105	ПАО «Юнипро»	ГРЭС (5)	11204	1419	130а, 132б, 135е, 142р, 793а
107	ПАО «Якутскэнерго»	ГРЭС (3) ТЭЦ (1)	622	158	198а, 204з, 209а

* - тип наземных экосистем (Гудилин, 1980).

Исследуемые объекты тепловой энергетики расположены по всей территории страны, включая г. Байконур Республики Казахстан, в котором расположена Байконурская ТЭЦ. Наибольшая их часть сконцентрирована в европейской части. ТЭЦ представлены в значительно большем количестве, за ними следуют ГРЭС, промышленные ТЭС и ДЭС (рис. 2.2.2). Объекты исследования размещены в наземных экосистемах, имеющих разный ассимиляционный потенциал к поглощению выбросов парниковых газов, что дифференцирует условия функционирования объектов тепловой энергетики.

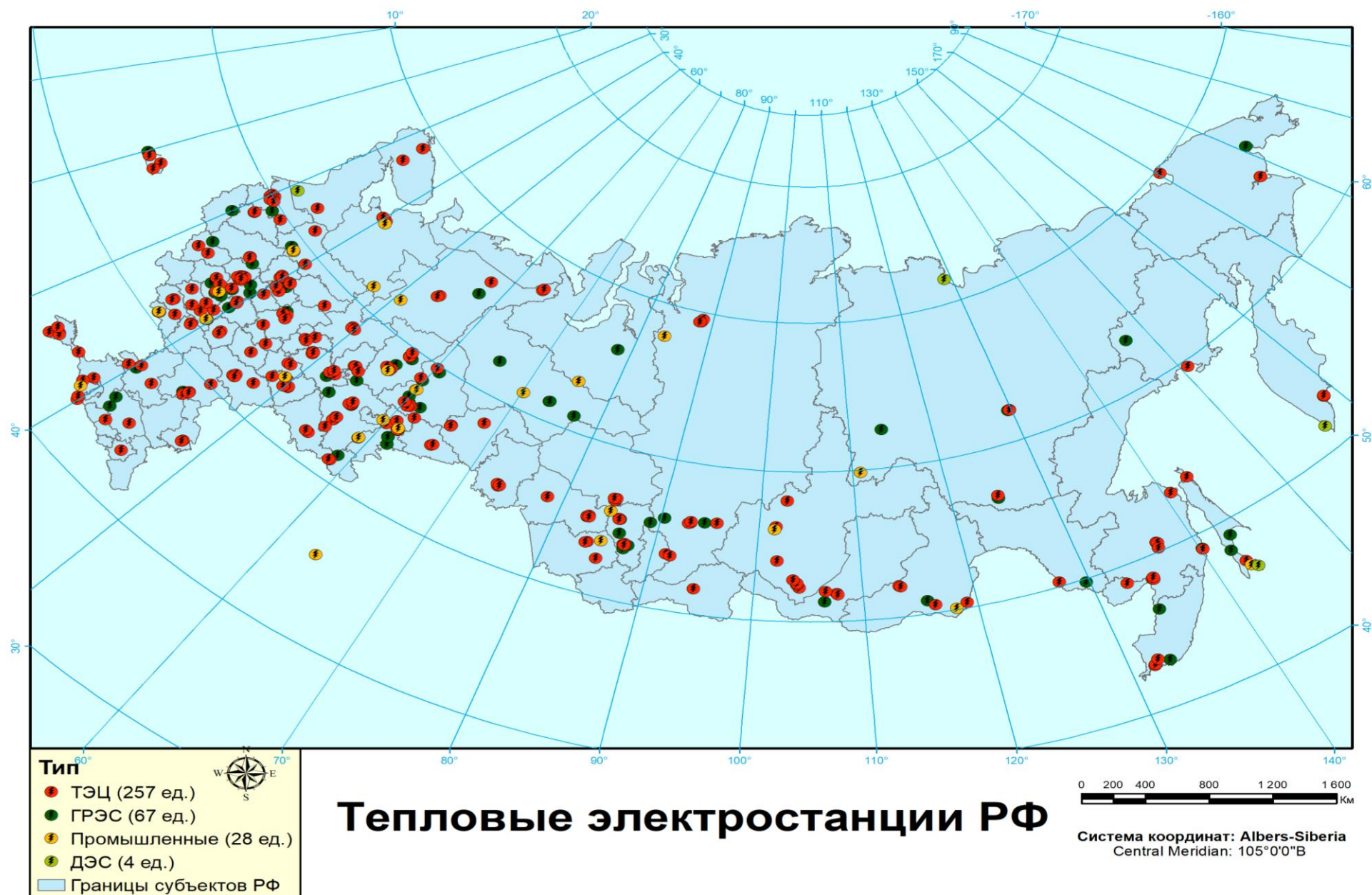


Рисунок 2.2.2. Расположение исследуемых объектов тепловой энергетики на территории РФ

Более подробно рассматриваются объекты тепловой энергетики Москвы на примере 16 крупнейших ТЭЦ, принадлежащих ПАО «Мосэнерго», ООО «Ситиэнерго», ООО «Росмикс» и ООО «ВТК-инвест». Их общая установленная электрическая мощность составляет 12,6 ГВт, годовая выработка электроэнергии – 63,2 млрд. кВтч (по данным 2020 года) с учетом областных ТЭЦ-22 и ТЭЦ-27, которые юридически относятся к территории Московской области, но вырабатывают электроэнергию в том числе для нужд Москвы.

Кроме вышеуказанных источников электроснабжения в городе действует 7 экспериментальных или нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) суммарной установленной электрической мощностью 64,8 МВт:

– 4 гидроэлектростанции: «Сходненская», «Карамышевская», «Перервинская» и ГЭС «Рублевского гидроузла» суммарной установленной электрической мощностью 36,0 МВт;

– 2 мусоросжигательных завода (МСЗ): Спецзавод № 2 (в консервации) и Спецзавод № 4 Комплекса по ОПТБиБО суммарной установленной электрической мощностью 26,7 МВт;

– 1 пневмоэлектрогенераторный агрегат (ПЭГА) для производства электрической энергии и холода на ГРС «Южная» установленной электрической мощностью 2,1 МВт.

Однако, доля выработки электроэнергии данными источниками в г. Москве незначительна, ввиду чего в дальнейшем в анализе они не рассматриваются.

2.3. Методы исследования

Проведенные исследования основываются на системном подходе к структурированию большого массива информации, систематизированной в рабочей базе данных об объектах тепловой энергетики с географической привязкой к типам наземных экосистем, содержащей также основные производственные, технологические, экологические и экосистемные показатели, а также комплексном рассмотрении влияния выбросов CO₂ и NO₂ на наземные экосистемы. При решении

частных задач исследования применены методы статистического анализа и классификации исследуемых объектов.

На первом этапе был проведен сбор и структурирование по тематическим разделам информации о деятельности исследуемых ТЭС из различных государственных и негосударственных источников: Минприроды России, Минэнерго России, Росреестр, Росприроднадзор, Росстат, АО «СО ЕЭС», генерирующие компании и др.

Затем с учетом специфики исследуемых объектов тепловой энергетики выбраны и верифицированы основанные на балансовых подходах алгоритмы экологической оценки углеродного и азотного следа, для чего использована информация о наземных экосистемах из «Экологического Атласа России» (2017) под редакцией Н.С. Касимова и В.С. Тикунова, информация 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).

Классификация природных экосистем базируется на ландшафтном подходе, ввиду того что экосистема также является неотъемлемой частью ландшафтов, образующих географическую (ландшафтную) оболочку Земли. В соответствии с ГОСТ 17.8.1.01-86. Ландшафт – это территориальная система, состоящая из взаимодействующих природных или природных и антропогенных компонентов и комплексов более низкого таксономического ранга. К природным компонентам ландшафтов относят воздух, поверхностные и подземные воды, горные породы, почвы, растительный и животный мир. К антропогенным компонентам относят все объекты производственной и непроизводственной деятельности человека (Артамонов, Гутников, 2023).

Для оценки ассимиляционных способностей наземных экосистем использованы экспертные индикаторы состояния наземных экосистем (Гутников, 2015), рассчитанные за базовый период климатической нормы, рекомендуемый всемирной метеорологической организацией 1961-1990 гг.: запасы сухой

фитомассы на 1 м^2 в $\text{кг}/\text{м}^2$ (Bo) и запасы гумуса в 1 м^2 почвы в $\text{кг}/\text{м}^2$ (Ho), на основе базового набора климатических показателей:

- абсолютная высота (H);
- средняя температура воздуха самого холодного месяца года (t_1);
- средняя температура воздуха самого теплого месяца года (t_2);
- годовая амплитуда средних температур воздуха (A_t);
- сумма темп-р за период со средними суточными темп-рами выше $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\sum t_{10}$);
- абсолютный минимум температур воздуха (t_{\min});
- абсолютный максимум температур воздуха (t_{\max});
- продолжительность безморозного периода, сутки (B_m);
- число дней со снежным покровом (C_n);
- среднее годовое количество осадков, мм (r);
- средняя годовая испаряемость, мм (E);
- коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову (K).

Данные индикаторы учитываются при последующем построении моделей динамики продуктивности экосистем, растительности и формировании среды обитания животного мира и нормированию антропогенных воздействий. Перечень и набор показателей может меняться в зависимости от решаемых задач моделирования динамики продукционных процессов, ассимиляционных способностей экосистем и биогеохимического круговорота элементов.

Показатели, характеризующие уровень антропогенной нагрузки ТЭС на наземные экосистемы, включают в себя производственные и экологические индикаторы: электрическая мощность; производство электроэнергии; коэффициент использования установленной мощности (КИУМ); расход условного топлива на выработку электроэнергии (УРУТ); выбросы основных загрязняющих веществ; площадь территории непосредственного воздействия; углеродный след (GHG_{fp}); азотный след (NO_{fp}); индекс углеродной нагрузки (I_{LC}); индекс азотной нагрузки (I_{LN}).

На следующем этапе проведена типизация объектов тепловой энергетики на экосистемной основе по трем диагностирующим признакам:

- тип тепловой электростанции (ГРЭС, ТЭЦ, промышленные ТЭС, ДЭС);
- используемое топливо (природный газ, уголь, мазут, дизельное топливо);
- численность населения поселений, в которых расположены ТЭС.

Затем проведен системный анализ основных производственных, технологических, экологических и экосистемных показателей с целью выявления взаимосвязей (факторов). Результатами системного анализа стали конкретные алгоритмы оценки балансовых соотношений антропогенных выбросов углерода и азота представленные и апробированные в соответствующих разделах работы.

Для расчета показателей углеродного и азотного следа производится сопоставление выбросов CO_2 или NO_2 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_{fp} – выбросы CO_2 при производстве 1 кВтч электроэнергии на конкретной ТЭС (углеродный след), г. $\text{CO}_2\text{e}/\text{кВтч}$;

NO_{fp} – выбросы NO_2 при производстве 1 кВтч электроэнергии на конкретной ТЭС (азотный след), г. $\text{NO}_2/\text{кВтч}$;

E_{CO_2} – фактические выбросы CO_2 , тонн/год;

E_{NO_2} – фактические выбросы NO_2 , тонн/год;

E_g – 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 (B_o) и запасов гумуса в почве (H_o) с учетом анализируемого вида фитоценоза и соответствующей ему структуры почвенного покрова в границах зоны непосредственного воздействия ТЭС по формулам 1.2 и 1.3.

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

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

где:

Bo_i – запасы сухой фитомассы, кг/м²;

Ho_j – запасы гумуса в почве, кг/м²;

C_{Bi} – запасы органического углерода в фитомассе, кг;

N_{Bi} – запасы органического азота в фитомассе, кг;

C_{Sj} – запасы органического углерода в почвенном покрове, кг;

N_{Sj} – запасы органического азота в почвенном покрове, кг;

0,5 и 0,58 – коэффициенты для перевода Bo_i и Ho_j в органический углерод;

S – площадь зоны непосредственного воздействия конкретной ТЭС, м²;

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 усреднённые показатели годового 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} – усреднённый показатель годового обновления углерода в фитомассе, кг/год;

C_{Saj} – усреднённый показатель годового обновления углерода в почвенном покрове, кг/год;

N_{Bai} – усреднённый показатель годового обновления азота в фитомассе, кг/год;

N_{Saj} – усреднённый показатель годового 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 годового обновления органического углерода и азота в наземных экосистемах (C_{Ta} и N_{Ta} кг/год) рассчитаны как сумма усреднённых показателей годового 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_2 е/кВтч; группа II – 950 г. CO_2 е/кВтч; группа III – 450 г. CO_2 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_2 е/кВтч.

ГЛАВА 3. РЕГИОНАЛЬНО-ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ

3.1. Типизация исследуемых объектов тепловой энергетики

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.

Системный анализ с использованием методов кластерного анализа производственных, экологических и экосистемных показателей позволил разделить исследуемые объекты тепловой энергетики на 4 группы (ГРЭС, ТЭЦ, промышленные и ДЭС) и 43 функционально-экологические подгруппы, дифференцированные в зависимости от структуры выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, вида используемого топлива, мощности источников выбросов, территориального расположения энергетических объектов, а также показателей запасов фитомассы фоновых к ним наземных экосистем (Табл. 3.1).

Таблица 3.1. Средние показатели по группам исследуемых ТЭС

	Установленная Мощность, МВт	Производство электроэнергии, млн. кВтч	КИУМ, %	Расход условного топлива, тыс. т.у.т.
I – ГРЭС	77 345	302 164	44,6	43 092
II – ТЭЦ	79 954	325 121	46,5	91 810
III – Промышленные	6 486	29 850	52,5	5 969
IV – Дизельные	18	8	5	н/д

В основе типизации лежат 3 главных диагностирующих признака (табл. 3.2):

- тип тепловой электростанции (ГРЭС, ТЭЦ, промышленные ТЭС, ДЭС);
- основное топливо (природный газ, уголь, мазут, дизельное топливо);
- численность населения поселений, в которых расположены ТЭС, в соответствии с СП 42.133330.2016.

Таблица 3.2. Рабочая типизация исследуемых объектов ТЭС

1 уровень (Тип электростанции)	2 уровень (Вид топлива)	3 уровень (Размер поселений, тыс. чел.)
I – ГРЭС	I – а (природный газ) I – б (уголь) I – с (мазут)	1 – крупнейшие свыше 1000; 2 – очень крупные 500-1000; 3 – крупные 250-500; 4 – большие 100-250; 5 – средние 50-100; 6 – малые 10-50; 7 – поселковые менее 10.
II – ТЭЦ	II – а (природный газ) II – б (уголь) II – с (мазут)	
III – Промышленные	III – а (природный газ) III – б (уголь) III – с (мазут)	
IV – Дизельные	IV – d (дизельное топливо)	

3.2. Государственные районные электростанции (ГРЭС)

Группа ГРЭС состоит из 67 объектов. Первоначально ГРЭС расшифровывалась как государственная районная электростанция, однако, со временем термин «ГРЭС» потерял свой первоначальный смысл «районная» и в современном понимании означает тепловая (конденсационная) электростанция большой мощности, производящая в основном электрическую энергию (табл. 3.3). ГРЭС является сложным энергетическим комплексом, состоящим из зданий, сооружений, энергетического и иного оборудования, трубопроводов, арматуры, контрольно-измерительных приборов и автоматики (Иваницкий, Юрченко, 2022).

Основными системами ГРЭС являются:

- котельная установка;
- паротурбинная установка;
- топливное хозяйство;
- система золо- и шлакоудаления, очистки дымовых газов;
- электрическая часть;
- техническое водоснабжение (для отвода избыточного тепла);
- система химической очистки и подготовки воды.

Таблица 3.3. Производственные и экосистемные показатели исследуемых подгрупп для группы «ГРЭС»

Группа	n	Электрическая мощность, МВт	Производство электроэнергии, млн. кВтч	КИУМ, %	Территория непосредственного воздействия, га	Запасы фитомассы (Bo), кг/м ²	Запасы гумуса в почве (Ho), кг/м ²	Выбросы CO ₂ , тонн	Выбросы NO _x , тонн	
ГРЭС	I-1-a	3	875	5658	47	163	32,7	5,7	814	885
	I-2-a	2	164	669	48	80	9,2	5,6	278	294
	I-2-b	4	1020	3456	33	294	26,3	3,6	284	6567
	I-3-a	6	11996	64578	49	674	30,4	4,5	30190	48405
	I-4-a	4	4182	21091	58	529	33,3	4,9	5072	14138
	I-4-b	1	1905	9686	58	446	49,7	8,0	891	14079
	I-5-a	2	3897	16067	58	467	34,4	3,0	6950	5072
	I-5-b	5	5941	21118	41	2066	26,0	3,8	27027	40883
	I-6-a	15	20993	73671	33	1920	39,8	5,5	4433	50764
	I-6-b	15	21216	70306	38	5386	47,4	5,4	17813	157880
	I-6-c	1	21	34	18	56	-	-	-	91
	I-7-a	3	3470	8414	25	541	61,7	6,6	2011	7854
	I-7-b	6	1665	7416	38	967	44,2	3,1	1762	12604

ГРЭС, как правило, являются градообразующими предприятиями и располагаются в поселениях с численностью населения от 10 до 50 тысяч человек, для ГРЭС характерно использование природного газа и угля в качестве основного вида топлива. Основная доля выработанной ГРЭС электроэнергии идет на продажу на оптовом рынке электроэнергии в другие регионы страны, а также для энергоснабжения крупных промышленных кластеров. На многих современных ГРЭС используются парогазотурбинные установки, что позволяет повысить их экономичность, улучшить экологические показатели и увеличить КПД.

Наиболее мощные ГРЭС в России являются, как правило, наиболее крупными эмитентами выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ. Яркими представителями являются: Сургутская ГРЭС-2 (5650 МВт), Рефтинская ГРЭС (3800 МВт), Костромская ГРЭС (3600 МВт), Пермская ГРЭС (3360 МВт), Сургутская ГРЭС-1 (3300 МВт) и др.

3.3. Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ)

Группа ТЭЦ включает в себя 257 объектов. Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) – разновидность тепловой электростанции, которая работает в режиме когенерации, то есть не только производит электроэнергию, но и является источником тепловой энергии в централизованных системах теплоснабжения (в виде пара и горячей воды, в том числе и для обеспечения горячего водоснабжения и отопления жилых объектов) (табл. 3.4).

ТЭЦ конструктивно устроена, как конденсационная электростанция, однако, при ее строительстве необходимо учитывать близость потребителей тепла в виде горячей воды и пара, так как передача тепла на большие расстояния экономически нецелесообразна (Аракелян и др., 1992). ТЭЦ чаще всего расположены в крупных городах. При этом в качестве основного вида топлива используется в основном природный газ, угольные ТЭЦ представлены в меньших количествах.

Таблица 3.4. Производственные и экосистемные показатели исследуемых подгрупп для группы «ТЭЦ»

Группа	n	Электрическая мощность, МВт	Производство электроэнергии, млн. кВтч	КИУМ, %	Территория непосредственного воздействия, га	Запасы фитомассы (Bo), кг/м ²	Запасы гумуса в почве (Ho), кг/м ²	Выбросы CO ₂ , тонн	Выбросы NO _x , тонн	
ТЭЦ	II-1-a	55	26083	117845	52	3871	51,1	6,1	11330	91628
	II-1-b	13	5355	25202	51	1699	26,4	4,1	11071	62384
	II-2-a	26	9909	40997	44	2040	33,2	5,4	5621	21223
	II-2-b	16	6588	27181	46	2244	40,3	4,6	11262	66149
	II-3-a	32	8172	30722	45	1949	109,4	7,1	10263	26981
	II-3-b	7	1442	4481	39	872	21,9	3,1	2123	10220
	II-3-c	1	12	16	15	84	26,1	3,5	79	1683
	II-4-a	32	7970	28299	36	2163	179,3	6,6	1925	25880
	II-4-b	16	6180	24866	45	2037	39,8	4,4	31016	48348
	II-5-a	10	1690	6889	47	712	42,2	5,0	332	6805
	II-5-b	17	2814	8518	38	1966	39,0	3,8	2290	23201
	II-6-a	14	1524	4535	31	637	44,7	4,7	633	3354
	II-6-b	7	960	2207	24	548	39,1	4,1	687	4244
	II-6-e	1	21	41	22	15	92,7	6,2	-	-
	II-7-a	4	870	2120	24	255	153,0	9,3	938	2444
	II-7-b	5	358	1159	25	368	3,6	-	1457	3777
II-7-e	1	6	43	82	6	71,3	6,0	-	-	

Для большинства тепловых электростанций мазут является резервным, аварийным или растопочным видом топлива. В России функционируют несколько ТЭЦ, для которых мазут является основным видом топлива, они расположены в Калининградской, Мурманской и Костромской областях. Данные электростанции являются «ветеранами» энергетических отраслей, которые находятся в эксплуатации уже более 50 лет.

Все наиболее мощные ТЭЦ в России принадлежат ПАО «Мосэнерго» и располагаются на территории г. Москва: ТЭЦ-26 (1800 МВт), ТЭЦ-21 (1760 МВт), ТЭЦ-23 (1420 МВт), ТЭЦ-25 (1370 МВт), ТЭЦ-22 (1300 МВт) и др. На данных ТЭЦ ведется планомерная работа по снижению и контролю выбросов парниковых газов, а также уделяется повышенное внимание вопросам охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов в связи их расположением внутри города.

3.4. Промышленные ТЭС

Группа промышленных ТЭС представлена 28 объектами. Промышленными являются электростанции, входящие в состав различных промышленных предприятий (ПАО «Северсталь», АО «ФосАгро», АО «Группа «Илим», ПАО «НЛМК», АО «Монди СЛПК», ПАО «Сургутнефтегаз», ПАО «Тулачермет» и др.), и предназначенные в основном для энергоснабжения данных предприятий, при этом энергоснабжение прилегающих к ним городских и сельских поселений является опциональной функцией (табл. 3.5) (Кайбичева, Лукашевич, 2022).

Наиболее мощными промышленными ТЭС в России являются: ТЭЦ ВАЗа мощностью 1172 МВт, ТЭЦ АО «Монди-СЛПК» мощностью 542 МВт, ТЭЦ ПАО «ППГХО» мощностью 410 МВт и др.

Таблица 3.5. Производственные и экосистемные показатели исследуемых подгрупп для группы «Промышленные ТЭС»

Группа	п	Электрическая мощность, МВт	Производство электроэнергии, млн. кВтч	КИУМ, %	Территория непосредственного воздействия, га	Запасы фитомассы (<i>Bo</i>), кг/м ²	Запасы гумуса в почве (<i>Ho</i>), кг/м ²	Выбросы CO ₂ , тонн	Выбросы NO _x , тонн	
Промышленные	III-1-a	2	429	1258	36	88	42,1	4,9	-	-
	III-2-a	3	1654	8568	77	379	40,9	6,4	13	1503
	III-3-a	7	1427	7974	52	445	54,8	5,7	-	-
	III-3-b	2	292	484	27	151	44,4	5,5	-	-
	III-4-a	2	310	965	46	70	44,2	5,0	225	232
	III-4-b	1	113	465	47	44	9,9	2,0	-	-
	III-5-a	2	546	2494	36	101	325,6	9,5	-	-
	III-5-b	2	501	1657	32	307	17,6	3,3	-	-
	III-5-c	1	48	109	26	63	0,5	4,7	-	-
	III-6-a	3	634	2619	39	365	50,5	5,2	-	-
	III-6-b	1	188	993	60	82	35,6	4,2	-	-
	III-7-a	2	344	2263	72	73	48,7	1,1	-	-

3.5. Дизельные электростанций (ДЭС)

Дизельные электростанции (ДЭС) представлены только 4 объектами общей установленной мощностью – 18,52 МВт, производством электроэнергии – 7,7 млн. кВтч, КИУМ – 9,3 % и территорией непосредственного воздействия – 14,6 га. В силу ограничений по мощности применяются в основном в качестве резервных или аварийных источников электроэнергии, а также в качестве основных для энергообеспечения поселков, находящихся вне единой энергетической системы России, установок связи, для энергоснабжения железнодорожных станций, в системе аварийного снабжения компьютерных сетей и других стратегических объектов (Дубовицкий, 2020). Ввиду незначительности масштаба их производственных показателей и труднодоступности информации об их производственной деятельности, данные объекты тепловой энергетики далее не рассматриваются.

3.6. Кластерный анализ исследуемых объектов тепловой энергетики

В целях установления статистически значимых взаимосвязей показателей выполнен корреляционный анализ (табл. 3.6) основных производственных показателей (С1 – С4) и экологических показателей (С5 – С10) для 356 исследуемых объектов тепловой энергетики который выявил достоверную статистическую зависимость между установленной мощностью и производством электроэнергии ($r = 0,920$), между производством электроэнергии и выбросами NO_x ($r = 0,671$), между запасами фитомассы фитоценозов и запасами гумуса в почвах ($r = 0,676$), между общими выбросами загрязняющих веществ и выбросами NO_x ($r = 0,891$).

При разделении общего массива данных на 43 функционально-экологические подгруппы отмечено усиление выявленных ранее корреляционных связей, что говорит о корректности предлагаемого в данной главе методического подхода для типизации объектов тепловой энергетики в целях последующей экологической оценке их углеродного и азотного следа (табл. 3.7).

Для выделения кластеров объектов со схожими условиями функционирования и схожим уровнем антропогенного воздействия на наземные экосистемы, находящиеся в зоне непосредственного воздействия, проведен иерархический кластерный анализ 43 подгрупп ТЭС. В основе иерархической кластеризации выявились природно-климатические особенности территорий, на которых расположены исследуемые объекты, а также показатели установленной мощности и вида используемого топлива (рис. 3.1.).

Некоторые подгруппы ГРЭС (I-6-b, I-3-a, I-4-b, I-2-a) не попали в кластеры, что говорит об их уникальности, обусловленной в первую очередь высокой установленной мощностью объектов и высокими показателями выбросов CO₂ и NO₂. Например, подгруппа угольных ГРЭС (I-6-b) имеет одни из самых высоких показателей мощности и выбросов.

Подгруппа дизельных электростанций (IV-7-d) не попала в кластер, что также подчеркивает уникальность данных объектов энергетики.

По критерию установленной мощности и количеству выбросов загрязняющих веществ объединились в кластер подгруппы (II-1-a и I-6-a), представляющие собой разные типы объектов.

В кластеры объединились подгруппы (II-3-c и I-6-c), также представляющие собой разные типы объектов, но использующие одинаковый вид топлива – мазут.

Отдельный интерес представляют объединившееся в кластеры подгруппы (II-3-a и II-4-a); (II-1-b и II-2-b); (I-4-a и I-5-a), имеющие одинаковые типы объектов энергетики, вид используемого топлива и близкие значения численности населения поселений, в которых расположены объекты.

В нижней части дендрограммы разместились в основном промышленные ТЭС. В общие кластеры объединились только подгруппы (III-1-a и III-6-a), остальные промышленные ТЭС либо не вошли в кластер, либо вошли с подгруппами других видов объектов. В подгруппах промышленных ТЭС показатели КИУМ, как правило, выше (III-7-a и III-2-a).

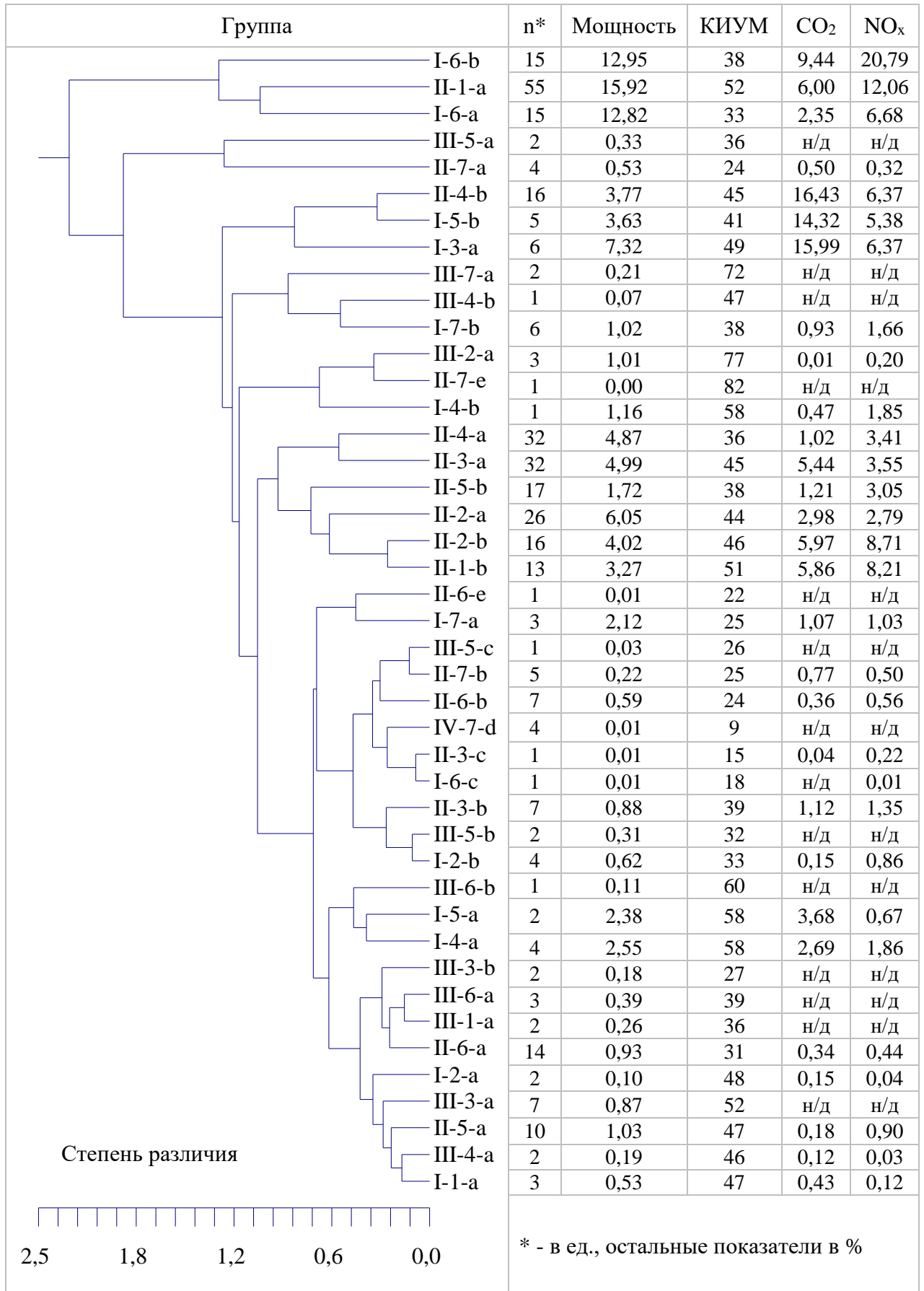


Рисунок 3.1. Иерархический кластерный анализ 43 групп ТЭС с оценкой удельного веса основных факторов дифференциации

Проведенный кластерный анализ выявил 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 коэффициент установленной мощности.

Разделение исследуемых объектов ТЭС на функционально-экологические группы позволило определить кластеры объектов, имеющие близкие условия функционирования и схожий уровень антропогенного воздействия на наземные экосистемы. В большинстве случаев подгруппы газовых и угольных объектов оказались в разных кластерах. Наиболее сильную антропогенную нагрузку на наземные экосистемы оказывают мощные угольные ГРЭС. Они являются доминирующими видами электростанций на территории Дальневосточного, Сибирского и Уральского федеральных округов. Поэтому наземные экосистемы, в границах которых они функционируют, должны обладать достаточно высоким ассимиляционным потенциалом к поглощению выбросов антропогенного углерода и азота.

Типизация электростанций на экосистемной основе фактически представляет собой инструмент определения экологических обоснований к перераспределению использования установленной мощности в зависимости от типа наземных экосистем. Полученные результаты показали актуальность проведения детального анализа внутри подгрупп для более точного выявления оригинальных типологических закономерностей.

ГЛАВА 4. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ

4.1. Динамика выбросов CO₂ в секторе «Энергетика»

Современные исследования и моделирование климатических процессов показали, что увеличение в атмосфере, в результате хозяйственной деятельности человека, концентрации парниковых газов приводит к нарушению естественного углеродного баланса в наземных экосистемах и имеет негативное воздействие на способность выполнения наземными экосистемами своих функций (Артамонов и др., 2019; Чепель, 2021).

Как известно одними из основных антропогенных факторов, влияющих на углеродный баланс в наземных экосистемах, являются выбросы CO₂, образующиеся при сжигании углеводородного топлива в результате деятельности объектов тепловой энергетики (Когут и др., 2021; Тимофеева, Мингалеева, 2011). Поскольку углекислый газ является основным регулируемым парниковым газом, то системный анализ сбалансированности выбросов и потенциала их связывания наземными экосистемами предлагается начать с экологической оценки углеродного следа и углеродной нагрузки ТЭС на основе предложенного нами индекса углеродной нагрузки (Артамонов и др., 2022).

Анализ динамики выбросов парниковых газов (переведены в CO₂-экв.) с 1990 по 2020 годы в секторе «Энергетика» показывает их определенную цикличность, которая связана с климатическими флуктуациями и тенденцией изменения уровня развития генерации электроэнергии на ТЭС в рассматриваемые годы (рис. 4.1). Отмечается общий тренд на снижение выбросов парниковых газов, который описывается логарифмическим уравнением: $y = -184,6\ln(x) + 1958$; $R^2 = 0,51$. 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.

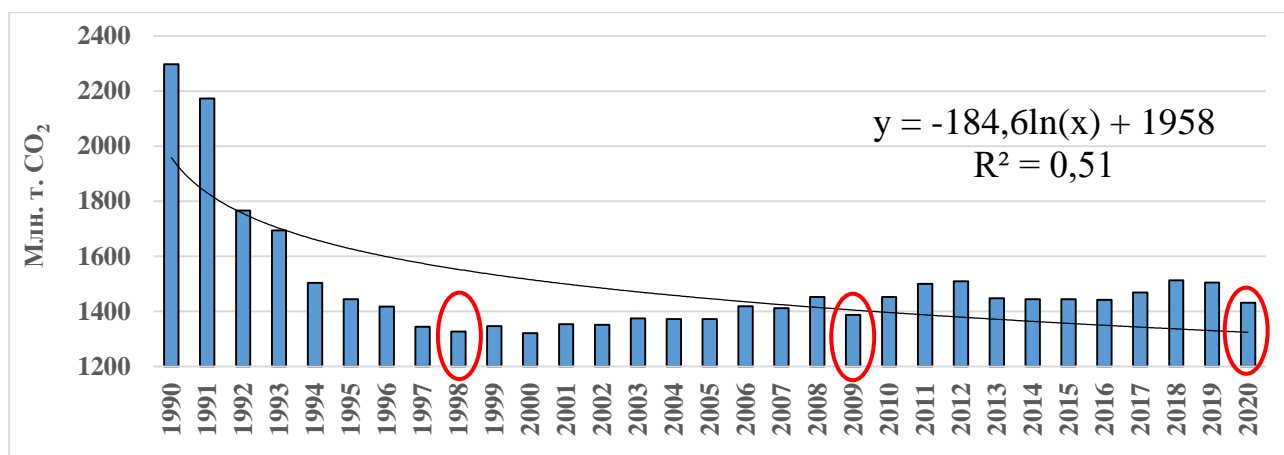


Рисунок 4.1. Динамика выбросов CO₂ в секторе «Энергетика» млн. тонн 1990-2020 гг.

Углекислый газ, как известно, активно ассимилируется наземными экосистемами в процессе фотосинтеза. При этом более высокой продуктивностью фотосинтеза обладают наземные экосистемы, расположенные в европейской части страны (рис. 4.2), что связано с природно-климатическими особенностями территории (Цельникер, Молчанов, 2005). Здесь же отмечается наиболее высокий уровень антропогенной нагрузки на наземные экосистемы (рис. 4.3) и сосредоточено основное количество исследуемых объектов тепловой энергетики см. (рис. 2.2.2). При наложении картосхем продуктивности наземных экосистем и уровня антропогенной нагрузки на экосистемы выделяются регионы с повышенной антропогенной нагрузкой (Артамонов, Гутников, 2018).



Рисунок 4.2. Продуктивность наземных экосистем, тонн/га в год (Голубева и др., 2016)

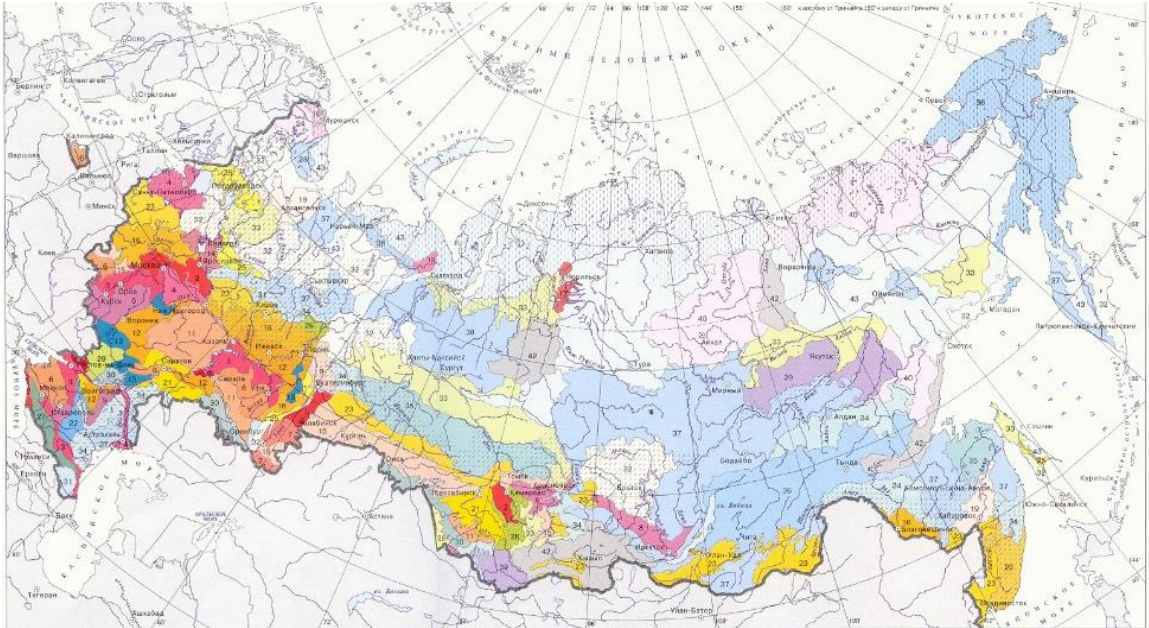


Рисунок 4.3. Уровень антропогенной нагрузки на экосистемы (Исаченко, 2012)

Регионы РФ с повышенной антропогенной нагрузкой, как правило, характеризуются высоким значением показателей плотности населения, урбанизацией, валового регионального продукта и потребления электроэнергии для промышленных нужд.

4.2. Расчет показателя углеродного следа от деятельности ТЭС

Для расчета показателя углеродного следа от деятельности ТЭС (GHG_{fr} , г. $\text{CO}_2\text{e}/\text{кВтч}$) производится сопоставление показателя количества выбросов CO_2 на производство электроэнергии по формуле 1.1.

Результаты расчета выявили электростанции с наибольшими показателями углеродного следа (табл. 4.1), который зависит от вида и состава используемого топлива, технического состояния котельного оборудования ТЭС и коэффициента используемой установленной мощности (КИУМ). Из общего ряда значительно выделяются ТЭС, имеющие низкие показатели КИУМ. Например, Томская ТЭЦ-1 введена в эксплуатацию в 1971, КИУМ составляет – 6 %, Дубровская ТЭЦ введена в эксплуатацию в 1933 году, КИУМ составляет – 16 %. В целом углеродный след отечественных ТЭС имеет куда более умеренные значения, в сравнении с наиболее крупными зарубежными тепловыми электростанциями (Don Grant et al., 2021).

Таблица 4.1. Электростанции с наибольшим показателем углеродного следа

№	Название	GHG_{fp} , г. $CO_2e/kВтч$	Мощность, МВт	Биом
01	Томская ТЭЦ-1	134,75	14,7	Южная тайга
02	Дубровская ТЭЦ-8	20,88	5	Южная тайга
03	Троицкая ГРЭС	16,06	1315	Луга, пастбища, пашни
04	Кызылская ТЭЦ	8,68	17	Луга, пастбища, пашни
05	Благовещенская ТЭЦ	7,73	400	Смеш. и листв. леса
06	Якутская ГРЭС	6,03	368	Средняя тайга
07	Мурманская ТЭЦ	4,91	12	Тундра
08	Бийская ТЭЦ	4,58	535	Луга, пастбища, пашни
09	Майская ГРЭС	4,48	80	Южная тайга
10	Красноярская ТЭЦ-3	3,84	206	Луга, пастбища, пашни

Большинство исследуемых ТЭС соответствует критериям «адаптационным проектам», при этом критериям «зеленых проектов» не соответствует Томская ТЭЦ-1, которая работает в режиме котельной и осуществляет в основном теплоснабжение ($GHG_{fp} = 134,75$ г. $CO_2e/kВтч$, при целевом значении – менее 100 г. $CO_2e/kВтч$) (Постановление Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587).

4.3. Оценка растительного и почвенного пулов углерода в наземных экосистемах зоны воздействия объектов тепловой энергетики

На следующем этапе для оценки растительного и почвенного пулов углерода в наземных экосистемах, расположенных в зоне непосредственного воздействия ТЭС, рассчитываются запасы органического углерода в фитомассе (C_{Vi} , кг) и почвенном покрове (C_{Sj} , кг) на основе показателей запасов сухой фитомассы (Bo_i , кг/м²) и запасов гумуса в почве (Ho_j , кг/м²) по формулам 1.2 и 1.3, с учетом анализируемого вида фитоценоза и соответствующей ему структуры почвенного покрова в границах зоны непосредственного воздействия ТЭС (S , м²).

Далее, с учетом различий в скорости обновления растительного и почвенного пулов органического углерода исследуемых наземных экосистем, произведен расчёт усреднённого показателя годового обновления углерода в фитомассе (C_{Vai} , кг/год) и почвенном покрове (C_{Saj} , кг/год) по формулам 1.4 и 1.5 соответственно.

Средний период обновления лесной фитомассы ($T_{C_{bi}}$) по умолчанию условно принимается за 100 лет и в будущем может экспериментально уточняться для различных видов наземных экосистем (Фокин, 1986).

Средний период обновления почвенного гумуса в верхних горизонтах почв ($T_{C_{sj}}$) по умолчанию условно принимается за 1000 лет и в будущем может экспериментально уточняться для различных видов почв (Марголина и др. 1988).

Суммарный показатель годовичного обновления органического углерода в наземных экосистемах в зоне непосредственного воздействия ТЭС (C_{Ta} , кг/год) рассчитан как сумма усреднённых показателей годовичного обновления углерода в фитомассе ($C_{B_{ai}}$) всех выделенных в зоне воздействия ТЭС видов фитоценозов ($i=n$) и структур почвенного покрова ($C_{S_{aj}}$) ($j=k$) по формуле 1.6.

В нашей работе мы использовали по одному виду фитоценоза и типу почвы. Результаты расчета выявили электростанции с наибольшими показателями годовичного обновления органического углерода, который фактически представляет собой экологическую емкость наземных экосистем по углероду в зоне непосредственного воздействия ТЭС (Табл. 4.2).

Таблица 4.2. Электростанции с наибольшим показателем годовичного обновления органического углерода в наземных экосистемах в зоне воздействия ТЭС

№	Название	C_{Ta} , тонн/год	Мощность, МВт	Биом
01	Камчатская ТЭЦ-2	4074,4	163	Смеш. и листв. леса
02	Камчатская ТЭЦ-1	3593,7	229	Смеш. и листв. леса
03	Адлерская ТЭС	2113,8	351	Смеш. и листв. леса
04	Череповецкая ГРЭС	1798,6	1051	Южная тайга
05	Сочинская ТЭС	1797,2	158	Смеш. и листв. леса
06	ТЭЦ-22	1270,2	1310	Смеш. и листв. леса
07	ГТУ-ТЭЦ ПК «Пригородное»	1234,0	129	Южная тайга
08	Новочеркасская ГРЭС	1129,4	1905	Луга, пастбища, пашни
09	ГТУ ТЭС ООО «РН- Туапсинский НПЗ»	1016,1	153	Смеш. и листв. леса
10	Южно-Сахалинская ТЭЦ-1	873,7	455	Средняя тайга

Наибольшие значения показателя S_{Ta} характерны для зон смешанных и лиственных лесов Южного и Дальневосточного федеральный округов, а также лугов и пастбищ, что обусловлено физико-географическими и природно-климатическими особенностями территории, а также размерами площади зоны непосредственного воздействия ТЭС, которая учитывается в расчётах.

4.4. Экологическая оценка углеродной нагрузки ТЭС

Для экологической оценки ассимиляционного потенциала наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС, к поглощению антропогенного углерода рассчитан индекс углеродной нагрузки I_{LC} , с учетом коэффициента для пересчета выбросов CO_2 в антропогенный углерод на основе соотношения молярных масс химических элементов – 44/12 или 3,67 по формуле 1.7 (Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р).

Углеродная нагрузка в значительной мере определяется производственными показателями ТЭС, техническим состоянием основного оборудования, количеством выбросов углекислого газа, видом используемого топлива, коэффициентом использования установленной мощности (Карасевич и др., 2022) и 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 восприятию разного уровня выбросов антропогенного углерода. Чем выше I_{LC} , тем ниже ассимиляционный потенциал наземных экосистем к поглощению антропогенного углерода. В перспективе, индекс углеродной нагрузки может быть сопоставлен с нормативными значениями, которые предстоит разрабатывать в рамках дорожной карты в целях реализации положений стратегии низкоуглеродного развития РФ.

Расчет индекса углеродной нагрузки показал широкий диапазон его значений от 0,0008 до 20,6, средним арифметическим значением – 0,81, стандартным отклонением – 2,41 и коэффициентом вариации – 2,986. Исследуемые ТЭС

разделены на 5 групп с использованием шкалы дифференциации углеродной нагрузки (табл. 4.3).

Важно отметить большую вариативность показателя «выбросы антропогенного углерода на единицу площади» для всех 5 групп. В группе с «очень высокой» углеродной нагрузкой значение показателя составляет 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.

Таблица 4.3. Шкала дифференциации углеродной нагрузки для типизации ТЭС

Углеродная нагрузка	Значение	Кол-во ТЭС, ед.	Мощность ТЭС, МВт	Выбросы С-СО ₂ ТЭС, тонн	Выбросы С-СО ₂ на ед. площади, кг/га
Очень высокая	более 10	7	7 807	15 210	1 581 – 29 511
Высокая	от 10 до 1	31	17 881	12 814	535 – 14 706
Повышенная	от 1 до 0,1	89	46 766	8 035	33 – 5 657
Средняя	от 0,1 до 0,01	47	21 217	827	18 – 4 944
Допустимая	менее 0,01	13	9 117	23	3 – 252

Из общей генеральной совокупности исследуемых объектов энергетики, в качестве репрезентативной выборки, выбраны 25 представительных ТЭС с различной углеродной нагрузкой, установленной мощностью, функционирующие в разных природно-климатических условиях и дифференцированные по индексу углеродной нагрузки (табл. 4.4).

Группа с «очень высокой» углеродной нагрузкой представлена в основном угольными ТЭС, имеющими наибольшие значения выбросов СО₂. 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.

Таблица 4.4. Экологическая оценка ТЭС по уровню углеродной нагрузки на наземные экосистемы в зоне их воздействия

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

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 секвестирования углерода (ассимиляционного потенциала), выражающимися посредством увеличения индекса листовой поверхности (leaf-area index) (Mndela et al., 2022).

4.5. Соотношение выбросов антропогенного углерода и суммарного показателя годичного обновления органического углерода

Диаграммы соотношения баланса показателей выбросов антропогенного углерода и суммарного показателя годичного обновления органического углерода C_{Ta} визуализируют масштаб различий в ассимиляционных способностях наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС для всех 5 групп с различным уровнем углеродной нагрузки (рис. 4.4. – 4.8.).

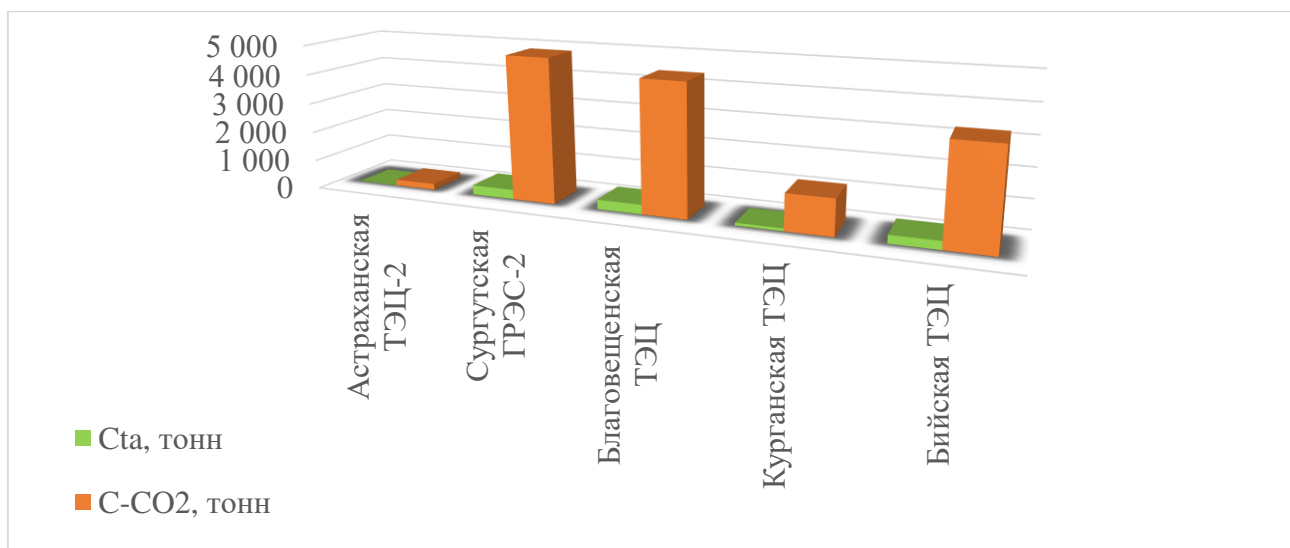


Рисунок 4.4. Соотношение показателей выбросов ($C-CO_2$) и обновления органического углерода (C_{Ta}) для группы ТЭС с «очень высоким» уровнем углеродной нагрузки

Поскольку наземные экосистемы, находящиеся в зоне непосредственного воздействия ТЭС с индексом углеродной нагрузки более 10 не способны самостоятельно вернуться в состояние динамического равновесия, из которого они

были выведены избыточным поступлением антропогенного углерода, поступающим в приземный слой атмосферы, для оптимизации уровня «очень высокой», «высокой» и «повышенной» углеродной нагрузки могут потребоваться меры государственного регулирования.

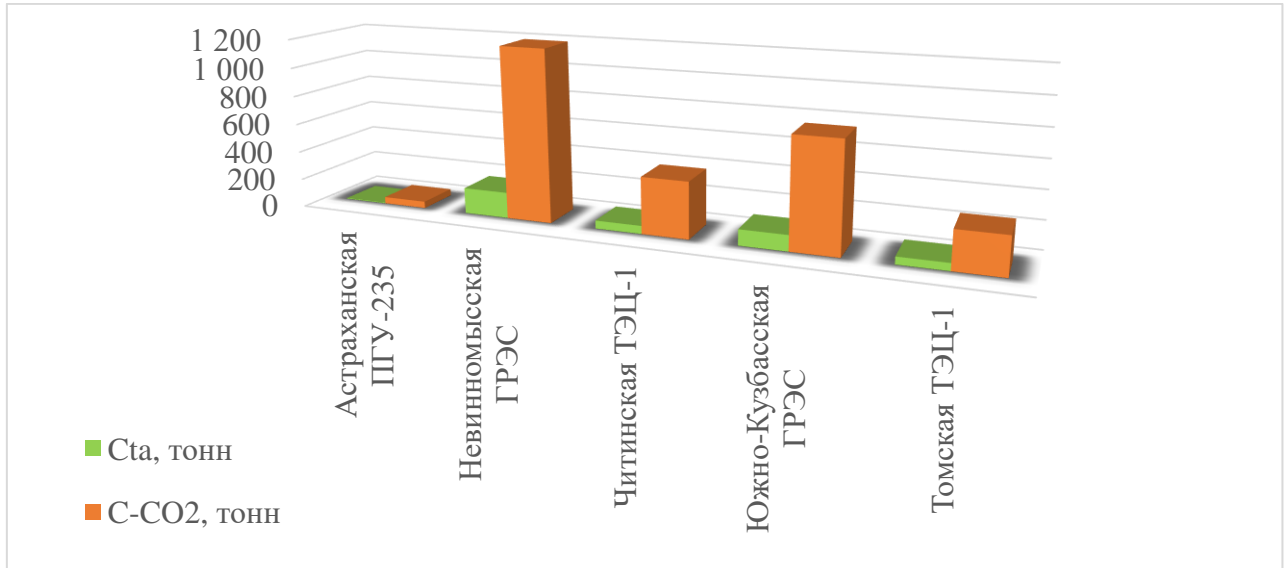


Рисунок 4.5. Соотношение показателей выбросов ($C-CO_2$) и обновления органического углерода ($C_{та}$) для группы ТЭС с «высоким» уровнем углеродной нагрузки

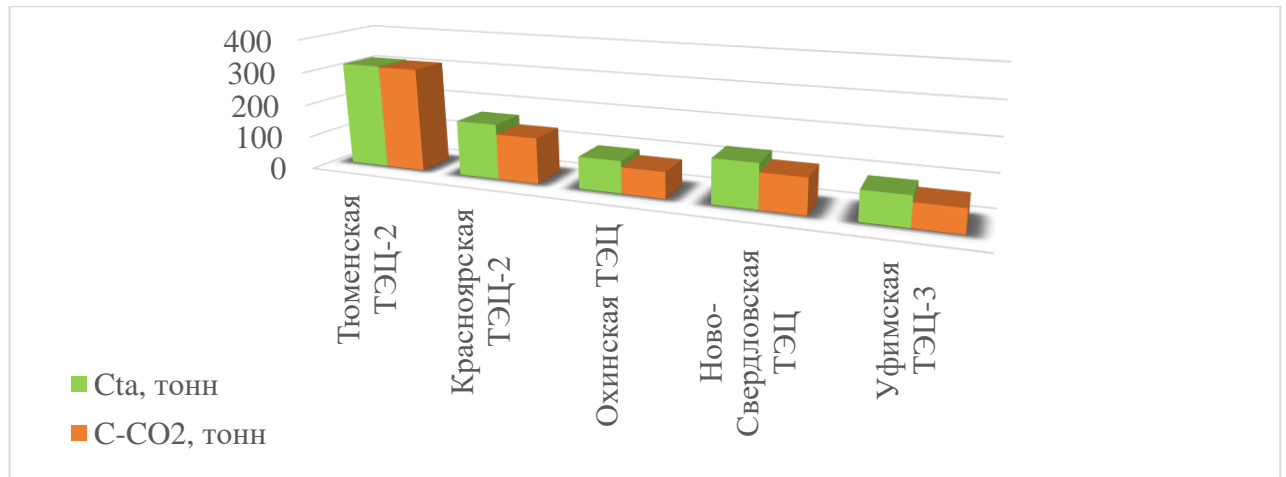


Рисунок 4.6. Соотношение показателей выбросов ($C-CO_2$) и обновления органического углерода ($C_{та}$) для группы ТЭС с «повышенным» уровнем углеродной нагрузки

В тоже время для оптимизации «среднего» уровня углеродной нагрузки ТЭС, достаточно принятие локальных управленческих и технологических решений (модернизация котельного оборудования, установка фильтров, использование менее «грязных» видов топлива и др.).

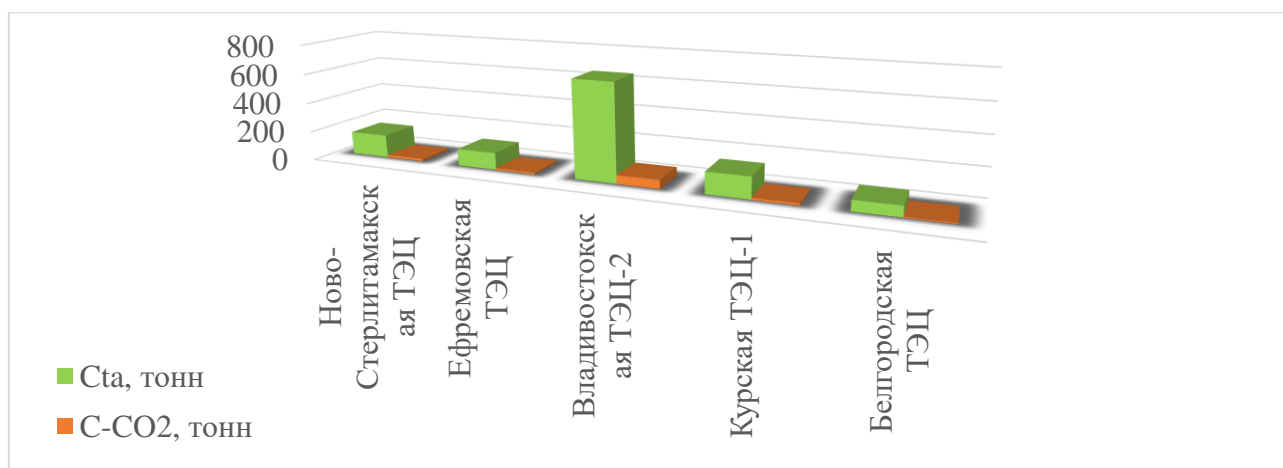


Рисунок 4.7. Соотношение показателей выбросов ($C-CO_2$) и обновления органического углерода ($C_{та}$) для группы ТЭС со «средним» уровнем углеродной нагрузки

Группа объектов с допустимой углеродной нагрузкой фактически представляет собой территории, близкие к углеродной нейтральности, что является важным элементом экологической оценки достижения целевых показателей стратегии углеродного развития России, поскольку тепловая энергетика является одним из основных источников выбросов парниковых газов.

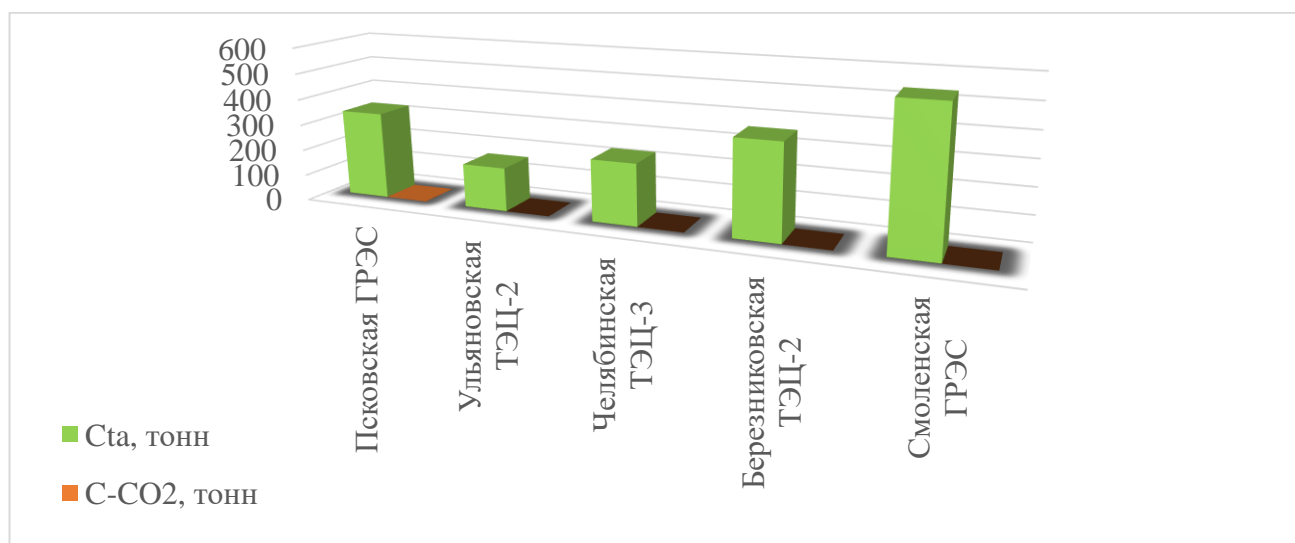


Рисунок 4.8. Соотношение показателей выбросов ($C-CO_2$) и обновления органического углерода ($C_{та}$) для группы ТЭС с «допустимым» уровнем углеродной нагрузки

Как видно, ассимиляционная способность отдельных наземных экосистем в зоне непосредственного воздействия не позволяет полностью нейтрализовать антропогенный углерод, углеродная нагрузка может быть выше порога самовосстановления, что приводит к деградации наземных экосистем. Основой

устойчивости наземных экосистем в этом случае является биологическая продуктивность и биоразнообразие. Однако, как уже было сказано общая облесённость соседних территорий позволяет говорить о возможности компенсации антропогенной нагрузки за счет лесных и сельскохозяйственных экосистем, прилегающих к зоне непосредственного воздействия ТЭС (Белик и др., 2013).

4.6. Взаимосвязи производственных и экологических показателей ТЭС

Для установления статистически значимых взаимосвязей между основными технологическими и экологическими показателями (электрическая мощность, годовое производство электроэнергии, годовой расход условного топлива, общие выбросы, выбросы оксида углерода, GHG_{fp} , C_{Ta} , I_{LC}) был проведен корреляционный анализ всего массива данных, которой выявил тесную корреляционную зависимость между мощностью и производством электроэнергии ($r = 0,920$) при отсутствии корреляционной зависимости между показателем углеродного следа GHG_{fp} и индексом углеродной нагрузки I_{LC} ($r = 0,159$), что вероятно связано с выраженной неоднородностью объектов (табл. 4.5).

Таблица 4.5. Корреляция экологических показателей по всем исследуемым объектам

№	Экологические показатели	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	Электрическая мощность, МВт	0,920	0,443	0,441	0,377	-0,044	0,138	0,204
C2	Годовое производство электроэнергии, млн. кВтч	1	0,394	0,434	0,360	-0,051	0,155	0,235
C3	Годовой расход условного топлива, тыс. т у.т. (Всего)		1	0,139	0,075	-0,031	0,077	0,025
C4	Выбросы всего, тонн			1	0,211	-0,015	0,163	0,079
C5	Выбросы CO ₂ , тонн				1	0,130	0,019	0,706
C6	GHG_{fp} , CO _{2e} /кВтч					1	-0,031	0,159
C7	C_{Ta}						1	-0,068
C8	I_{LC}							1

При разделении исследуемых ТЭС на группы в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587, установлены более функционально-информативные корреляционные зависимости, существенно

отличные от результатов по общей группе (табл. 4.6 – 4.8). Так, в группе «ГРЭС» наиболее высокие корреляционные зависимости отмечены между годовым производством электроэнергии и установленной мощностью ($r=0,893$), между выбросами оксида углерода и показателем углеродного следа ($r=0,741$), и индексом углеродной нагрузки I_{LC} ($r=0,796$).

Таблица 4.6. Корреляция экологических показателей в группе «ГРЭС» (n=65)

№	Экологические показатели	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	Электрическая мощность, МВт	0,893	0,323	0,388	0,393	-0,054	0,227	0,354
C2	Годовое производство электроэнергии, млн. кВтч	1	0,228	0,395	0,371	-0,144	0,240	0,438
C3	Годовой расход условного топлива, тыс. т у.т. (Всего)		1	-0,014	-0,045	-0,048	0,035	-0,196
C4	Выбросы всего, тонн			1	0,109	0,025	0,351	-0,037
C5	Выбросы CO ₂ , тонн				1	0,741	-0,067	0,796
C6	GHG_{fp} , CO ₂ e/кВтч					1	-0,126	0,227
C7	C_{Ta}						1	-0,202
C8	I_{LC}							1

В группе «Угольные ТЭЦ» наиболее высокая корреляционная зависимость отмечена между годовым производством электроэнергии и установленной мощностью ($r=0,927$), между выбросами оксида углерода и индексом углеродной нагрузки I_{LC} ($r=0,885$), между показателем углеродного следа GHG_{fp} и индексом углеродной нагрузки I_{LC} ($r=0,813$). Между производством электроэнергии и общими выбросами корреляция чуть ниже и составляет ($r=0,644$).

Таблица 4.7. Корреляция экологических показателей в группе «Угольные ТЭЦ» (n=72)

№	Экологические показатели	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	Электрическая мощность, МВт	0,927	0,601	0,714	0,165	-0,157	0,393	0,114
C2	Годовое производство электроэнергии, млн. кВтч	1	0,561	0,644	0,245	-0,076	0,372	0,209
C3	Годовой расход условного топлива, тыс. т у.т. (Всего)		1	0,690	0,276	0,042	0,234	0,282
C4	Выбросы всего, тонн			1	0,233	-0,047	0,0001	0,219
C5	Выбросы CO ₂ , тонн				1	0,667	0,205	0,885
C6	GHG_{fp} , CO ₂ e/кВтч					1	0,005	0,813
C7	C_{Ta}						1	-0,026
C8	I_{LC}							1

В группе «Газовые ТЭЦ» наиболее высокая корреляционная зависимость отмечена между годовым производством электроэнергии и установленной мощностью ($r=0,926$), между производством электроэнергии и расходом условного топлива ($r=0,657$). Однако, между показателем углеродного следа GHG_{fp} и индексом углеродной нагрузки I_{LC} корреляционная связь почти отсутствует ($r=0,190$).

В группах угольных и газовых ТЭЦ отмечена более высокая корреляционная взаимосвязь между производством электроэнергии и расходом условного топлива, а также между выбросами загрязняющих веществ и производством электроэнергии. ТЭЦ, как правило, имеют меньшую мощность и, соответственно, меньшую зону непосредственного воздействия, в то время как ГРЭС занимают большие площади наземных экосистем.

Таблица 4.8. Корреляция экологических показателей в группе «Газовые ТЭЦ» (n=211)

№	Экологические показатели	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	Электрическая мощность, МВт	0,926	0,654	0,497	0,167	-0,085	0,084	0,027
C2	Годовое производство электроэнергии, млн. кВтч	1	0,657	0,491	0,133	-0,078	0,110	0,004
C3	Годовой расход условного топлива, тыс. т у.т. (Всего)		1	0,407	0,011	-0,042	0,068	0,028
C4	Выбросы всего, тонн			1	0,270	-0,036	0,171	0,122
C5	Выбросы CO ₂ , тонн				1	0,155	0,033	0,598
C6	GHG_{fp} , CO ₂ е/кВтч					1	-0,029	0,190
C7	C_{Ta}						1	-0,076
C8	I_{LC}							1

В группах ГРЭС и газовых ТЭЦ между показателями количества выбросов парниковых газов на производство электроэнергии GHG_{fp} и I_{LC} отмечена низкая корреляционная зависимость ($r = 0,227$) и ($r = 0,190$) соответственно, что может быть связано с особенностями технологических процессов при сжигании топлива в котлоагрегатах электростанций.

При этом в группе угольных ТЭЦ отмечена сильная корреляционная связь между показателями углеродного следа GHG_{fp} и индексом углеродной нагрузки I_{LC}

($r=0,813$), что говорит о корректности примененного балансового метода для расчета уровня углеродной нагрузки в зоне непосредственного воздействия ТЭС.

4.7. Типизация объектов тепловой энергетики по уровню углеродного следа

Для типизации объектов тепловой энергетики по уровню углеродного следа и ассимиляционным способностям наземных экосистем, проведен иерархический кластерный анализ 25 представительных электростанций по основным диагностическим показателям (электрическая мощность, годовое производство электроэнергии, КИУМ, площадь территории непосредственного воздействия, выбросы CO_2 , GHG_{fp} , C_{Ta} , I_{LC}) (рис. 4.9).

Анализ классификации показал, что ТЭС сгруппировались преимущественно по физико-географическим и природно-климатическим особенностям территории, которые в свою очередь определяют устойчивость экосистем к антропогенному воздействию, а также формируют ассимиляционные способности. Кроме того, в дендрограмме просматривается кластеризация исследуемых объектов ТЭС в соответствии с предложенной нами ранее шкалой дифференциации по пяти группам уровня углеродной нагрузки (см. табл. 4.4).

Как видно на дендрограмме наиболее отличной от остальных оказались Сургутская ГРЭС-2, Астраханская ТЭЦ-2 и Томская ТЭЦ-1. Каждая из них имеет наиболее высокие показатели по индексу углеродной нагрузки или углеродному следу. Все они относятся к группам с «очень высокой» и «высокой» углеродной нагрузкой.

В наиболее информативные кластеры объединились: Бийская и Благовещенская ТЭЦ-2, которые также относятся к группе с «очень высокой» углеродной нагрузкой; Смоленская ГРЭС и Владивостокская ТЭЦ, которые входят в группы со «средним» и «допустимым» уровнем углеродной нагрузки; Ульяновская ТЭЦ-2 и Псковская ГРЭС, вошли в группу с «допустимым» уровнем углеродной нагрузки. Уфимская ТЭЦ-3 и Ново-Стерлитамакская ТЭЦ, а также Курская ТЭЦ-1 и Ефремовская ТЭЦ объединились в кластеры по принципу территориальной близости.

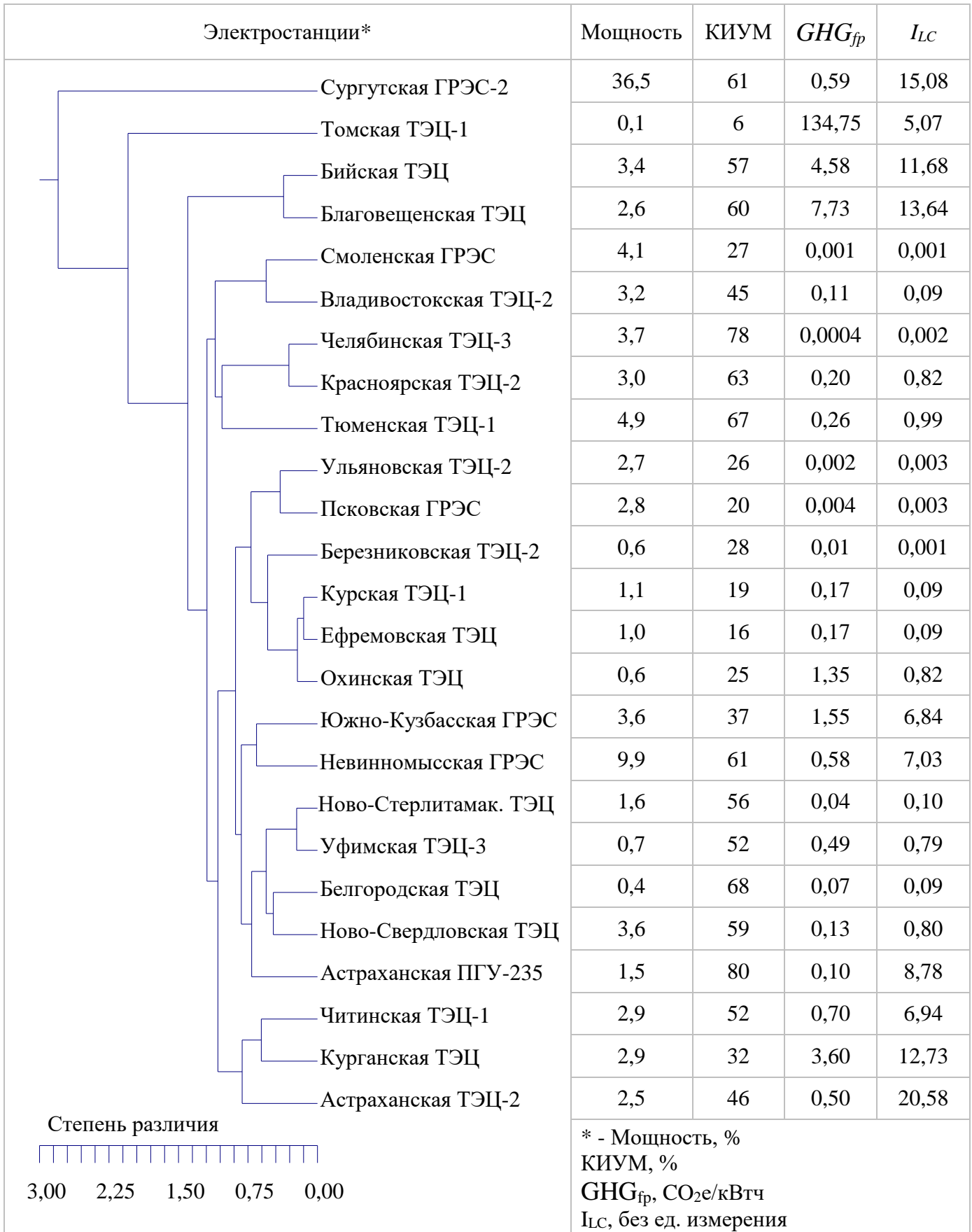


Рисунок 4.9. Кластерный анализ 25 представительных объектов тепловой энергетики с оценкой удельного веса основных факторов дифференциации показателей углеродной нагрузки

4.8. Экологическая оценка углеродного следа объектов тепловой энергетики

Проведенная экологическая оценка углеродного следа объектов тепловой энергетики показала, что в России с 1990 года отмечается общий тренд на снижение выбросов парниковых газов, в связи с чем имеются хорошие перспективы реализации сценариев стратегии низкоуглеродного развития России и постепенного перехода субъектов РФ к уровню углерод-нейтральных территорий. Большинство исследуемых электростанций соответствует критериям «адаптационным проектам», 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. CO₂e/кВтч, при целевом значении – менее 100 г. CO₂e/кВтч).

Для достижения целевых значений показателей стратегии углеродного развития представляется целесообразным модернизация ТЭС с установкой современного котельного оборудования с целью повышения значений показателя коэффициента используемой установленной мощности до 65-70 %, с последующим выводом из эксплуатации устаревших и невостребованных ТЭС. Многие ТЭС уже сейчас активно переводятся на более экологичное газовое топливо. Наиболее предпочтительной задачей представляется оптимизация режимов работы действующих объектов тепловой энергетики в условиях, обеспечивающих относительно сбалансированный круговорот углерода, чем строительство новых. Это представляется особенно актуальным в связи планируемым к 2035 году вводом в эксплуатацию новых ТЭС суммарной мощностью 84,6 ГВт (Схема территориального планирования Российской Федерации в области энергетики, 2016).

Результаты расчета углеродного следа тепловых электростанций GHG_{fp} в соотношении с индексом углеродной нагрузки I_{LC} показали четкую дифференциацию объектов, относящиеся к разным технологическим группам (ГРЭС, угольные ТЭЦ, газовые ТЭЦ). Более высокий уровень углеродного следа GHG_{fp} имеют в основном работающие на угле старые электростанции невысокой мощности, значительная часть которых имеет показатели КИУМ, не превышающие

25 %. С учетом этого можно ставить вопрос об их экологической целесообразности и возможной модернизации оборудования.

Предложенный индекс углеродной нагрузки позволил дифференцировать степень углеродной нагрузки ТЭС на локальные наземные экосистемы с выделением 5 групп нагрузки: очень высокой, высокой, повышенной, средней и допустимой, что дает возможность уточнить масштаб их воздействия на окружающую природную среду с учетом текущего состояния ассимиляционных способностей прилегающих к зонам их влияния наземных экосистем, поскольку для некоторых из них ассимиляционная способность по усвоению антропогенного углерода превышена в десятки раз. Это в свою очередь может быть принято во внимание при разработке и корректировке региональных энергетических стратегий и программ социально-экономического развития субъектов РФ – с использованием геоинформационных систем в области охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов (Пархоменко, Кошева, 2021).

Как и следовало ожидать, наиболее экологически безопасными объектами энергетики оказались преимущественно газовые ТЭЦ, индекс углеродной нагрузки I_{LC} которых меньше значения 0,01. Это является дополнительным аргументом целесообразности их функционально-экологической оценки как наилучших доступных технологий в соответствии «зелеными стандартами».

В то же время необходимо учитывать не только локальную, но и регионально-дифференцированную потенциальную ёмкость фоновых наземных экосистем, наличие большого количества лесных экосистем в непосредственной близости от многих ТЭС позволяет обеспечить повышенную буферность наземных экосистем в зоне их воздействия.

ГЛАВА 5. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АЗОТНОГО СЛЕДА ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ

5.1. Динамика выбросов NO_x от стационарных источников

Наряду с экологической оценкой углеродного следа, другим химическим элементом, который важно учитывать при различных экологических оценках антропогенного воздействия ТЭС при производстве электроэнергии является антропогенный азот, в частности, выбросы оксидов азота NO_x , часть из которых относятся к парниковым газам (N_2O), а другие характеризуются выраженным токсическим эффектом (NO и NO_2). Они несут серьёзную опасность для наземных экосистем, так как оказывают большое влияние на биоразнообразие, способны вызывать кислотные дожди, а также оказывают негативное воздействие на человека (Артамонов, Гутников, 2020; Васенев и др., 2018; Valentini et al., 2014).

В данной главе предлагается провести экологическую оценку азотного следа ТЭС, а также определить ассимиляционные способности наземных экосистем к связыванию выбросов антропогенного азота, образующегося при производстве электроэнергии на ТЭС, на основе предложенного нами индекса азотной нагрузки (Артамонов и др., 2022).

Объем выбросов оксидов азота NO_x (пересчитаны в NO_2) предприятий тепловой энергетики зависит от многих факторов: вида топлива, технологии топочного процесса и очистки уходящих газов (Герцык, Беляков, 2020). Анализ динамики производства электроэнергии и выбросов оксидов азота от стационарных источников показывает их стабилизацию на фоне характерного для последних 10 лет роста производства электроэнергии (рис. 5.1). Межгодовая динамика имеет разнонаправленные линии тренда. С 1991 года отмечено резкое снижение количества выбросов NO_x и производства электроэнергии, что связано с общим снижением промышленного производства на фоне последствий распада СССР. С 2000 года отмечен незначительный рост выбросов NO_x на фоне ярко выраженного роста производства электроэнергии, что вероятно говорит о более эффективном использовании топлива благодаря началу процесса постепенного технологического перевооружения производственной базы топливно-

энергетического комплекса страны. Синхронизированное снижение уровня выбросов NO_x и производства электроэнергии в 2009, 2015 и 2020 годах было связано со снижением производственной деятельности на фоне региональных геополитических кризисов и пандемии COVID-19. В 2021 году оба показателя показали рост.

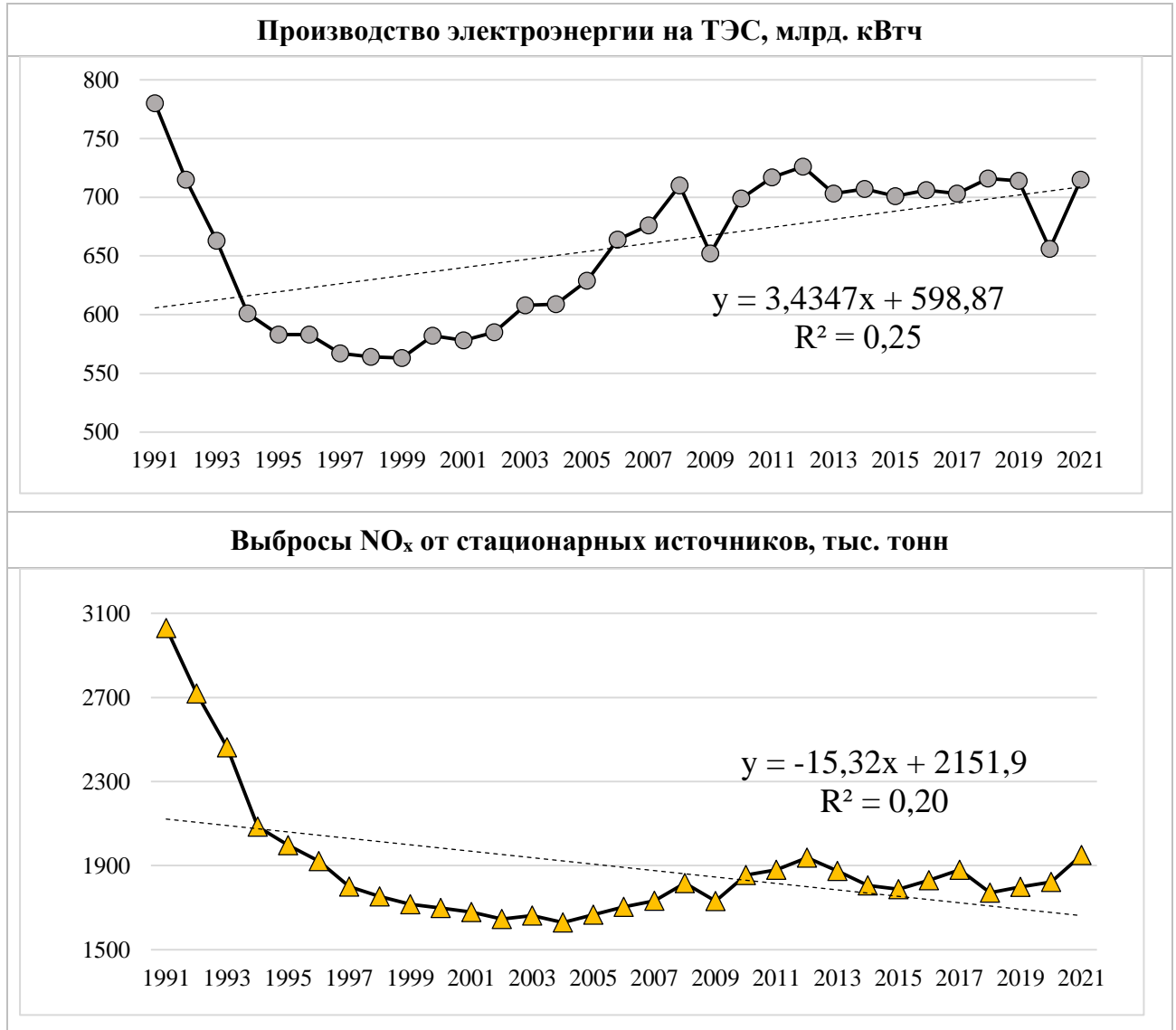


Рисунок 5.1. Динамика выбросов NO_x от стационарных источников на фоне производства электроэнергии на ТЭС с 1991 – 2021 гг. (Промышленное производство в России, 2021)

Положения Парижского климатического соглашения по достижению сбалансированности между антропогенными выбросами парниковых газов, получаемых в результате промышленной деятельности человека и их поглощением наземными экосистемами, также являются актуальными для выбросов оксидов

азота, особенно учитывая имеющиеся у России обязательства по выполнению положений Конвенции о биологическом разнообразии. При определении очередности модернизации оборудования ТЭС или вывода их из эксплуатации предлагается также учитывать соотношение оказываемой антропогенной нагрузки от выбросов NO_x на локальные наземные экосистемы и ассимиляционный потенциал наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС, по связыванию выбросов антропогенного азота.

5.2. Расчет показателя азотного следа от деятельности ТЭС

Для расчета показателя азотного следа от деятельности ТЭС (NO_{fp} , г. $\text{NO}_2/\text{кВтч}$) производится сопоставление показателя количества выбросов NO_x в пересчете на NO_2 на показатель производства электроэнергии по формуле 1.1.

Результаты расчета выявили электростанции с наибольшими показателями азотного следа (табл. 5.1). Все они, как правило, имеют невысокую установленную мощность и показатели КИУМ меньше среднего значения по России.

Таблица 5.1. Электростанции с наибольшим показателем азотного следа

№	Название	NO_{fp} , г. $\text{NO}_2/\text{кВтч}$	Мощность, МВт	Биом
01	Мурманская ТЭЦ	105,19	12	Тундра
02	Томская ТЭЦ-1	21,51	14,7	Южная тайга
03	Воркутинская ТЭЦ-1	8,45	25	Тундра
04	Богословская ТЭЦ	7,77	135	Средняя тайга
05	Чульманская ТЭЦ	7,75	48	Средняя тайга
06	Дубровская ТЭЦ-8	7,26	5	Южная тайга
07	Якутская ТЭЦ	6,89	12	Средняя тайга
08	Апатитская ТЭЦ	6,71	266	Тундра
09	Иркутская ТЭЦ-6	6,50	270	Средняя тайга
10	Пермская ТЭЦ-13	6,02	34	Южная тайга

Мурманская ТЭЦ в качестве топлива использует мазут. Полученные результаты существенно отличаются от лидеров по показателю углеродного следа (GHG_{fp}): Томская ТЭЦ-1 (134,7 г. $\text{CO}_2\text{e}/\text{кВтч}$); Дубровская ТЭЦ-8 (20,880 г.

CO₂e/кВтч); Троицкая ГРЭС (16,06 г. CO₂e/кВтч); Кызылская ТЭЦ (8,675 г. CO₂e/кВтч); Благовещенская ТЭЦ (7,73 г. CO₂e/кВтч), что связано с особенностями состава используемого топлива, влияющего на удельные выбросы углекислого газа и оксидов азота, а также техническим состоянием котельного оборудования ТЭС. Среднее соотношение выбросов NO₂ и CO, фиксируемое в отчетности 2-ТП (воздух) среди всех исследуемых объектов энергетики составляет 6 к 1 (при пересчете CO в CO₂ – соотношение 5 к 1). Количество выбросов оксидов азота превосходят выбросы по углекислому газу ввиду особенностей технологического процесса по сжиганию природного газа и угля (ИТС 38-2022. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии», 2022).

5.3. Оценка растительного и почвенного пулов азота в наземных экосистемах зоны воздействия объектов тепловой энергетики

На следующем этапе для оценки растительного и почвенного пулов азота в наземных экосистемах, расположенных в зоне непосредственного воздействия ТЭС, рассчитываются запасы органического азота в фитомассе (N_{Bi} , кг) и почвенном покрове (N_{Sj} , кг) по ранее предложенному методу (Артамонов и др., 2022) и на основании значений соотношения азота к органическому углероду (N:C) характерных для основных видов биомов России. Показатели рассчитываются с учетом анализируемого вида фитоценоза и соответствующей ему структуры почвенного покрова и с учетом коэффициентов для перевода показателей запасов сухой фитомассы (Bo_i , кг/м²) и запасов гумуса в почве (Ho_j , кг/м²) в органический углерод (0,5 и 0,58 соответственно) по формулам 1.2 и 1.3.

Далее, как и в случае с органическим углеродом, произведен расчёт усреднённого показателя годичного обновления азота в фитомассе (N_{Bai} , кг/год) и почвенном покрове (N_{Saj} , кг/год) по формулам 1.4 и 1.5 соответственно.

Суммарный показатель годичного обновления органического азота наземных экосистем в зоне непосредственного воздействия ТЭС (N_{Ta} , кг/год) рассчитан как сумма усреднённых показателей годичного обновления азота в фитомассе (N_{Bai})

всех выделенных в зоне воздействия ТЭС видов фитоценозов ($i=n$) и структур почвенного покрова (N_{Saj}) ($j=k$) по формуле 1.6.

В нашей работе мы использовали по одному виду фитоценоза и типу почвы. Результаты расчета выявили электростанции с наибольшими показателями годовичного обновления органического азота, который фактически представляет собой экологическую емкость наземных экосистем в зоне непосредственного воздействия ТЭС по азоту (Табл. 5.2).

Таблица 5.2. Электростанции с наибольшим показателем годовичного обновления органического азота в наземных экосистемах в зоне непосредственного воздействия ТЭС

№	Название	N_{Ta} , кг/год	Мощность, МВт	Биом
01	Камчатская ТЭЦ-2	52 550	163	Смеш. и листв. леса
02	Камчатская ТЭЦ-1	46 349	229	Смеш. и листв. леса
03	Адлерская ТЭС	27 379	351	Смеш. и листв. леса
04	Череповецкая ГРЭС	24 310	1051	Южная тайга
05	Новочеркасская ГРЭС	24 242	1905	Луга, пастбища, пашни
06	Сочинская ТЭС	23 277	158	Смеш. и листв. леса
07	ТЭЦ-22 (Москва)	16 980	1310	Смеш. и листв. леса
08	ГТУ-ТЭЦ ПК «Пригородное»	16 162	129	Южная тайга
09	Назаровская ГРЭС	15 186	1308	Луга, пастбища, пашни
10	ГТУ ТЭС ООО «РН-Туапсинский НПЗ»	13 238	153	Смеш. и листв. леса

Результаты расчета показателя N_{Ta} схожи с экологической емкостью наземных экосистем по углероду S_{Ta} (см. таблицу 4.2). Наибольшие значения N_{Ta} имеют зоны смешанных и лиственных лесов Южного, Центрального и Дальневосточного федеральной округов, а также луга и пастбища. Такие значения обусловлены различиями физико-географических и природно-климатических особенностей территории, а также размерами площади территории непосредственного воздействия ТЭС, которая учитывается в расчётах.

5.4. Экологическая оценка азотной нагрузки ТЭС

Для экологической оценки ассимиляционного потенциала наземных экосистем зоне непосредственного воздействия ТЭС к поглощению антропогенного азота рассчитывается индекс азотной нагрузки I_{LN} с учетом коэффициента для пересчета выбросов NO_2 в антропогенный азот, на основе соотношения молярных масс химических элементов – 46/14 или 3,28 по формуле 1.7.

Азотная нагрузка в значительной мере определяется показателями годового производства электроэнергии, техническим состоянием объекта, видом используемого топлива, коэффициентом использования установленной мощности (КИУМ) и 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.

Расчет индекса азотной нагрузки показал широкий диапазон его значений от 0,2 до 2195, средним арифметическим значением – 213,9, стандартным отклонением – 312,6 и коэффициентом вариации – 1,462, что значительно отличается от аналогичных показателей индекса углеродной нагрузки. Исследуемые ТЭС разделены на 5 групп с использованием шкалы дифференциации азотной нагрузки (табл. 5.3). 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, обладающим схожим 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).

Таблица 5.3. Шкала дифференциации азотной нагрузки для типизации ТЭС

Азотная нагрузка	Значение	Кол-во ТЭС, ед.	Мощность ТЭС, МВт	Выбросы N-NO ₂ ТЭС, тонн	Выбросы N-NO ₂ на единицу площади, кг/га	Площадь экосистем необходимая для нейтрализации антропогенного азота, га
Чрезвычайно высокая	более 1000	7	12 244	37 235	3 625 – 41 252	8 445 – 676 534
Очень высокая	от 1000 до 100	136	84 803	145 460	411 – 35 589	619 – 174 014
Высокая	от 100 до 10	57	12 948	10 599	375 – 7245	599 – 38 465
Средняя	10-1	8	1 413	661	69 – 5 859	91 – 8 617
Допустимая	менее 1	1	42	0,3	10	-

Из общей генеральной совокупности исследуемых объектов энергетики, в качестве репрезентативной выборки, выбраны 21 представительные ТЭС, функционирующие в разных природно-климатических условиях и дифференцированные по значению индекса азотной нагрузки (табл. 5.4).

Как и в случае углерода, группа с «чрезвычайно высокой» азотной нагрузкой представлена в основном 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. Наибольшие показатели индекса азотной нагрузки I_{LN} отмечены у Рефтинской ГРЭС, Омской ТЭЦ-5, Сургутской ГРЭС-2, Читинской ТЭЦ-1 и Ново-Иркутской ТЭЦ.

В группу с «допустимой» азотной нагрузкой попала только 1 газовая электростанция – Калужская ТЭЦ, расположенная в г. Калуга, обладающая невысокой мощностью и небольшими объемами выбросов NO₂ (1,1 тонн), кроме того, она фактически работает в режиме котельной, показатель КИУМ составляет всего 3,6 %. Зона непосредственного воздействия Калужской ТЭЦ расположена в смешанных и лиственных лесах.

Таблица 5.4. Экологическая оценка ТЭС по уровню азотной нагрузки на наземные экосистемы в зоне их воздействия

Станция	I_{LN}	МВт	Выбросы NO_2 , тонн	Зона воздействия, га*	Биом
Чрезвычайно высокая (I_{LN} более 1000)					
Рефтинская ГРЭС	2 195,1	3800	66 571	492,0	Южная тайга
Омская ТЭЦ-5	1 905,5	735	13 968	148,4	Луга, пастб., пашни
Сургутская ГРЭС-2	1 788,7	5657	24 199	186,5	Северная тайга
Читинская ТЭЦ-1	1 465,6	452	3 736	118,0	Средняя тайга
Ново-Иркутская ТЭЦ	1 226,9	705	8 913	138,7	Смешан. и листв. леса
Очень высокая (I_{LN} от 1000 до 100)					
Автозаводская ТЭЦ	989,0	580	5 228	44,8	Смешан. и листв. леса
Иркутская ТЭЦ-6	974,2	270	4 656	96,2	Средняя тайга
Западно-Сибирская ТЭЦ	931,2	600	7 961	121,1	Луга, пастб., пашни
Улан-Удэнская ТЭЦ-1	924,8	148	2 394	104,7	Луга, пастб., пашни
Ново-Свердловская ТЭЦ	918,9	557	5 301	93,6	Южная тайга
Высокая (I_{LN} от 100 до 10)					
Саратовская ГРЭС	99,8	54	233	35,2	Луга, пастб., пашни
ТЭЦ-11	95,4	330	644	46,5	Смешан. и листв. леса
Шерловогорская ТЭЦ	94,4	12	59	38,1	Прочие земли
Краснодарская ТЭЦ	93,9	1091	2 566	108,0	Луга, пастб., пашни
Партизанская ГРЭС	93,0	203	2 449	105,9	Смешан. и листв. леса
Средняя (I_{LN} от 10 до 1)					
Дорогобужская ТЭЦ	9,8	128	173	82,3	Смешан. и листв. леса
Курская ТЭЦ (СЗР)	9,7	116	97,6	35,7	Смешан. и листв. леса
Адлерская ТЭС	8,1	351	62,5	37,9	Смешан. и листв. леса
Джубгинская ТЭС	5,0	200	25,0	40,3	Луга, пастб., пашни
Камчатская ТЭЦ-2	4,9	163	83,4	53,0	Смешан. и листв. леса
Допустимая (I_{LN} менее 1)					
Калужская ТЭЦ	0,2	41,8	1,1	30,2	Смешан. и листв. леса

* - СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03

В целом азотная нагрузка на наземные экосистемы имеет более значительные показатели, чем углеродная нагрузка. Многие наземные экосистемы не способны к полному связыванию выбросов антропогенного азота, значительная часть которого поступает в прилегающие наземные экосистемы создавая повышенный модуль «азотной нагрузки».

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). Многие крупные объекты ТЭС находятся в непосредственной близости от сельскохозяйственных земель, на которых осуществляется производство сельскохозяйственной продукции, крупнейшие из которых, например, Рефтинская ГРЭС, Невинномысская ГРЭС, Ставропольская ГРЭС (Артамонов, Гутников, 2018).

5.5. Соотношение выбросов антропогенного азота и суммарного показателя годовичного обновления органического азота

Диаграммы соотношения баланса показателей выбросов антропогенного азота и суммарного показателя годовичного обновления органического азота в экосистемах N_{Ta} визуализируют масштаб различий в ассимиляционных способностях наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС для групп с «чрезвычайно высоким», «очень высоким», «высоким» и «средним» показателем индекса азотной нагрузки I_{LN} .

Большинство наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС, попали в группы с «высокой», «очень высокой» и «чрезвычайно высокой» азотной нагрузки. Для оптимизации высоких уровней азотной нагрузки могут потребоваться меры государственного регулирования. Данные территории фактически представляют собой биогеохимические ареалы с резким изменением химического элементного состава компонентов окружающей природной среды. Границы этих ареалов определяются локальным сочетанием факторов антропогенной нагрузки и природно-фоновых характеристик территории. (рис. 5.2. – 5.5.).

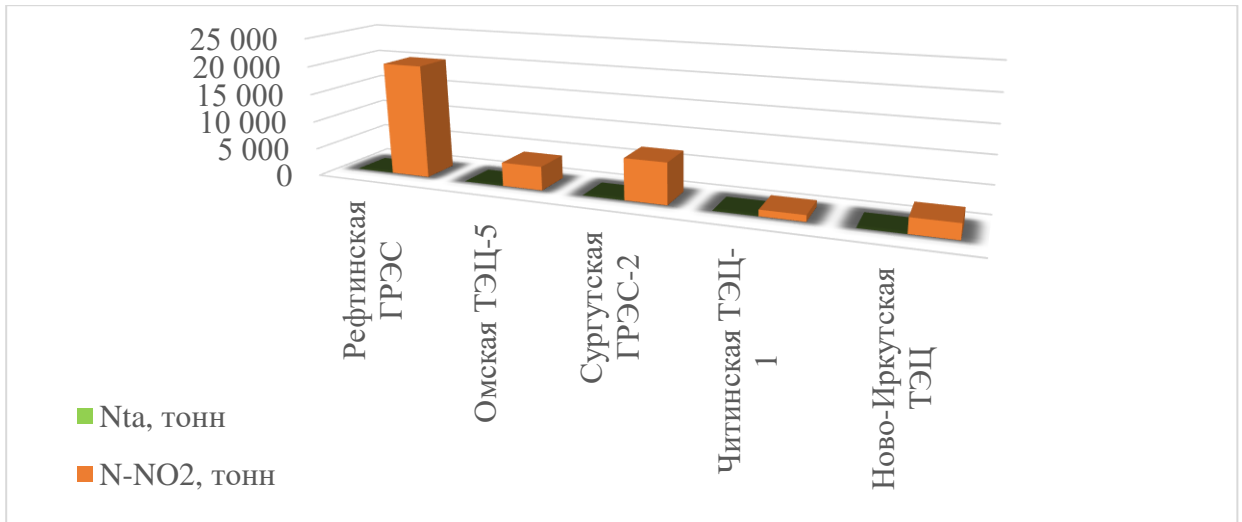


Рисунок 5.2. Соотношение показателей выбросов ($N-NO_2$) и обновления органического азота для группы ТЭС с «чрезвычайно высоким» уровнем азотной нагрузки

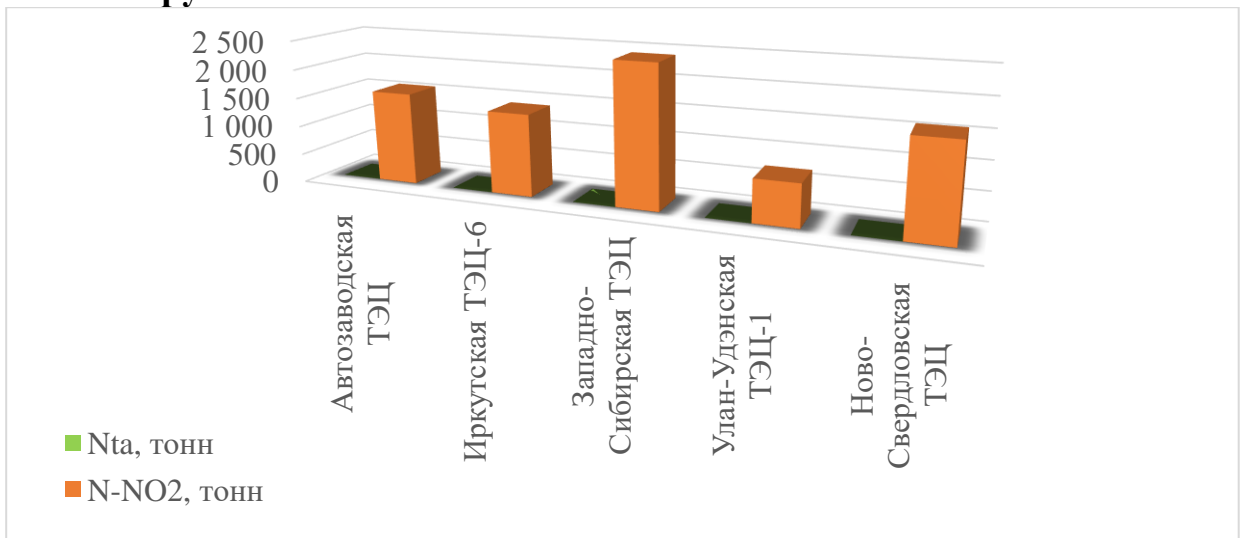


Рисунок 5.3. Соотношение показателей выбросов ($N-NO_2$) и обновления органического азота для группы ТЭС с «очень высоким» уровнем азотной нагрузки

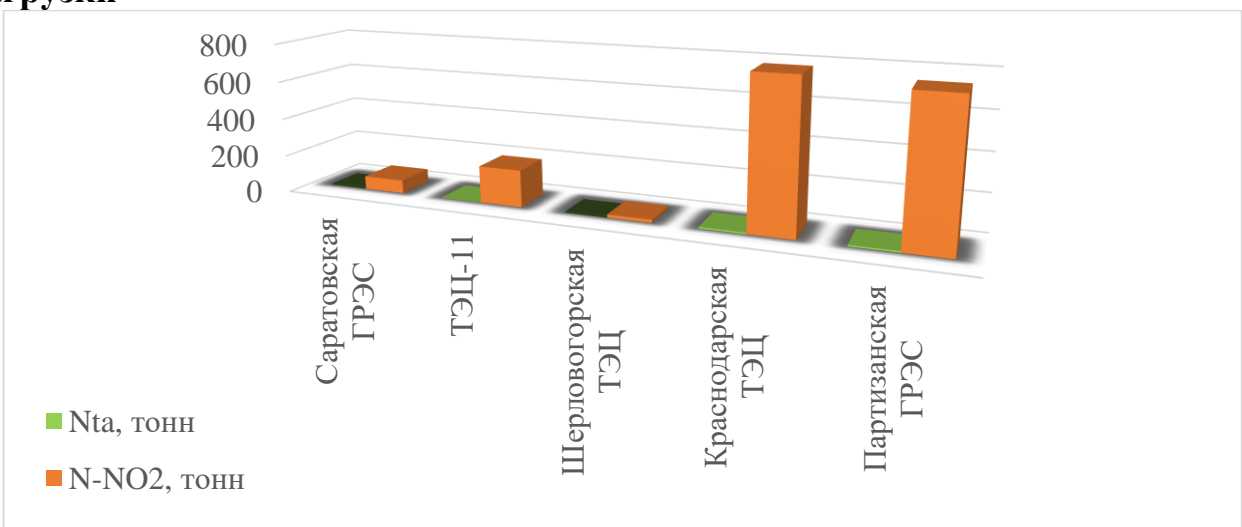


Рисунок 5.4. Соотношение показателей выбросов ($N-NO_2$) и обновления органического азота для группы ТЭС с «высоким» уровнем азотной нагрузки

Экосистемы, которые подвержены средней азотной нагрузке требуют проведения дополнительных исследований с целью определения границ толерантности по воздействию антропогенного азота для тех или иных типов наземных экосистем.

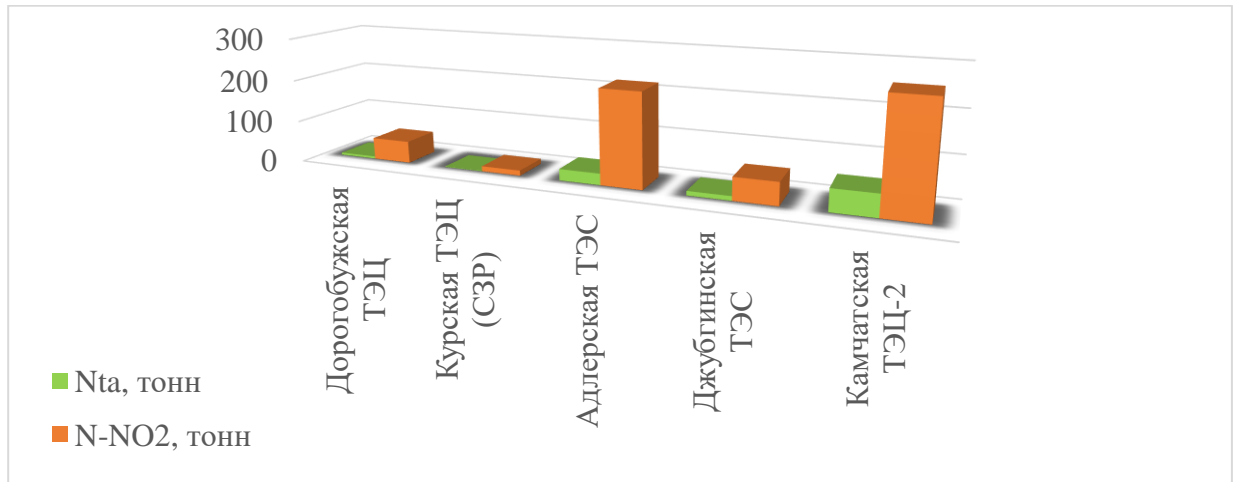


Рисунок 5.5. Соотношение показателей выбросов (N-NO₂) и обновления органического азота для группы ТЭС со «средним» уровнем азотной нагрузки

К территории так называемой азотной нейтральности в нашем исследовании можно отнести только наземные экосистемы, находящиеся в зоне непосредственного воздействия Калужской ТЭЦ. Основой устойчивости наземных экосистем является биологическая продуктивность и биоразнообразие. Облесенность соседних территорий позволяет говорить о возможности частичной компенсации антропогенной нагрузки за счет лесных и сельскохозяйственных экосистем, прилегающих к зоне непосредственного воздействия ТЭС.

5.6. Взаимосвязи производственных и экологических показателей ТЭС

Для установления статистически значимых взаимосвязей между основными технологическими и экологическими показателями (электрическая мощность, годовое производство электроэнергии, годовой расход условного топлива, общие выбросы, выбросы оксидов азота, NO_{fp} , N_{Ta} , I_{LN}) был проведен корреляционный анализ всего массива данных, который выявил тесную корреляционную зависимость между мощностью и производством электроэнергии ($r = 0,920$) при отсутствии корреляционной зависимости между показателем азотного следа и

индексом азотной нагрузки I_{LN} ($r = 0,116$), что также связано с очевидной неоднородностью объектов. Годовое производство электроэнергии имеет высокую корреляционную зависимость с выбросами оксидов азота ($r = 0,671$) (табл. 5.5).

Таблица 5.5. Корреляция экологических показателей по всем объектам исследования

№	Экологические показатели	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	Электрическая мощность, МВт	0,920	0,443	0,441	0,655	-0,056	0,206	0,502
C2	Годовое производство электроэнергии, млн. кВтч	1	0,394	0,434	0,671	-0,063	0,190	0,492
C3	Годовой расход условного топлива, тыс. т у.т. (Всего)		1	0,139	0,194	-0,037	0,073	0,241
C4	Выбросы всего, тонн			1	0,891	0,052	0,205	0,621
C5	Выбросы NO ₂ , тонн				1	0,008	0,223	0,679
C6	NO _{fp} , NO _x /кВтч					1	-0,033	0,116
C7	N _{Ta}						1	-0,053
C8	I _{LN}							1

При разделении исследуемых ТЭС на группы в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587, установлены более функционально-информативные корреляционные зависимости, существенно отличные от результатов по общей группе (табл. 5.6 – 5.8).

Так, в группе «ГРЭС» отмечена наиболее высокая корреляционная зависимость между индексом азотной нагрузки и выбросами оксидов азота ($r = 0,893$), между годовым производством электроэнергии и индексом азотной нагрузки ($r = 0,759$), тогда как между показателями NO_{fp} и I_{LN} отмечена слабая корреляционная зависимость ($r = 0,274$).

Таблица 5.6. Корреляция экологических показателей в группе «ГРЭС» (n=65)

№	Экологические показатели	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	Электрическая мощность, МВт	0,893	0,323	0,388	0,619	-0,032	0,226	0,740
C2	Годовое производство электроэнергии, млн. кВтч	1	0,228	0,395	0,643	-0,126	0,145	0,759
C3	Годовой расход условного топлива, тыс. т у.т. (Всего)		1	-0,014	0,017	-0,073	-0,009	0,003
C4	Выбросы всего, тонн			1	0,912	0,352	0,373	0,696
C5	Выбросы NO ₂ , тонн				1	0,290	0,269	0,860
C6	NO _{fp} , NO _x /кВтч					1	0,223	0,274
C7	N _{Ta}						1	-0,012
C8	I _{LN}							1

В группе «Угольные ТЭЦ» наиболее высокая корреляционная зависимость отмечена между годовым производством электроэнергии и выбросами оксидов азота ($r = 0,889$), между общими выбросами загрязняющих веществ и индексом азотной нагрузки ($r = 0,732$). Отмечена слабая корреляционная связь между показателями азотного следа NO_{fp} и индексом азотной нагрузки I_{LN} ($r = 0,309$).

Таблица 5.7. Корреляция экологических показателей в группе «Угольные ТЭЦ» (n=72)

№	Экологические показатели	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	Электрическая мощность, МВт	0,927	0,601	0,714	0,847	-0,131	0,395	0,557
C2	Годовое производство электроэнергии, млн. кВтч	1	0,561	0,644	0,889	-0,140	0,419	0,540
C3	Годовой расход условного топлива, тыс. т у.т. (Всего)		1	0,690	0,563	-0,060	0,201	0,551
C4	Выбросы всего, тонн			1	0,771	0,024	-0,071	0,732
C5	Выбросы NO ₂ , тонн				1	0,023	0,185	0,727
C6	NO_{fp} , $NOx/кВтч$					1	-0,097	0,309
C7	N_{Ta}						1	-0,276
C8	I_{LN}							1

В группе «Газовые ТЭЦ» отмечена высокая корреляционная зависимость между годовым производством электроэнергии и годовым расходом условного топлива ($r = 0,657$). Между показателями азотного следа NO_{fp} и индексом азотной нагрузки I_{LN} корреляционная зависимость отсутствует ($r = 0,160$).

Таблица 5.8. Корреляция экологических показателей в группе «Газовые ТЭЦ» (n=211)

№	Экологические показатели	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	Электрическая мощность, МВт	0,926	0,654	0,497	0,577	-0,144	0,076	0,347
C2	Годовое производство электроэнергии, млн. кВтч	1	0,657	0,491	0,576	-0,166	0,098	0,278
C3	Годовой расход условного топлива, тыс. т у.т. (Всего)		1	0,407	0,481	-0,087	0,049	0,267
C4	Выбросы всего, тонн			1	0,960	0,016	0,169	0,406
C5	Выбросы NO ₂ , тонн				1	-0,023	0,164	0,461
C6	NO_{fp} , $NOx/кВтч$					1	-0,045	0,160
C7	N_{Ta}						1	-0,122
C8	I_{LN}							1

Индекс азотной нагрузки I_{LN} в группе «ГРЭС» имеет ярко выраженные корреляционные взаимосвязи с остальными экологическими показателями, однако в группе «Угольные ТЭЦ» количество значимых взаимосвязей снижается, в группе «Газовых ТЭЦ» I_{LN} не имеет значимых взаимосвязей. В группах газовых и угольных ТЭЦ выявлены схожие значения корреляционной зависимости между производством электроэнергии и расходом условного топлива. В группах ГРЭС и угольных ТЭЦ выявлены схожие значения корреляционной зависимости между показателями выбросов оксидов азота и индексов азотной нагрузки. Это может быть связано с технологическими особенностями и функциональным назначением объектов ТЭЦ, имеющих сравнительно меньшие мощности и предназначенных для электро- и теплоснабжения населенных пунктов.

5.7. Типизация объектов тепловой энергетики по уровню азотного следа

Для типизации объектов тепловой энергетики по уровню азотного следа, а также ассимиляционных способностей наземных экосистем, находящихся в зоне непосредственного воздействия ТЭС, проведен иерархический кластерный анализ 21 представительных электростанций по показателям (электрическая мощность, годовое производство электроэнергии, КИУМ, площадь территории непосредственного воздействия, выбросы NO_2 , NO_{fp} , N_{Ta} , I_{LN}) (рис. 5.6).

Анализ классификации показал, что ТЭС сгруппировались по физико-географическим и природно-климатическим особенностям территории, которые в свою очередь определяют устойчивость экосистем к антропогенному воздействию, а также формируют ассимиляционные способности.

Наиболее отличной от остальных оказались Омская ТЭЦ-5 и Иркутская ТЭЦ-6. Уникальность этих станций обусловлена высокими показателями NO_{fp} и N_{Ta} . Наибольшую азотную нагрузку на наземные экосистемы оказывают Рефтинская ГРЭС, Омская ТЭЦ-5 и Сургутская ГРЭС-2, что обусловлено очень высокими показателями выбросов NO_2 на фоне относительно невысоких показателей годичного обновления органического азота в наземных экосистемах в

зоне непосредственного воздействия ТЭС (N_{Ta}). Все электростанции из группы «чрезвычайно высокой» нагрузки расположены в нижней части дендрограммы.

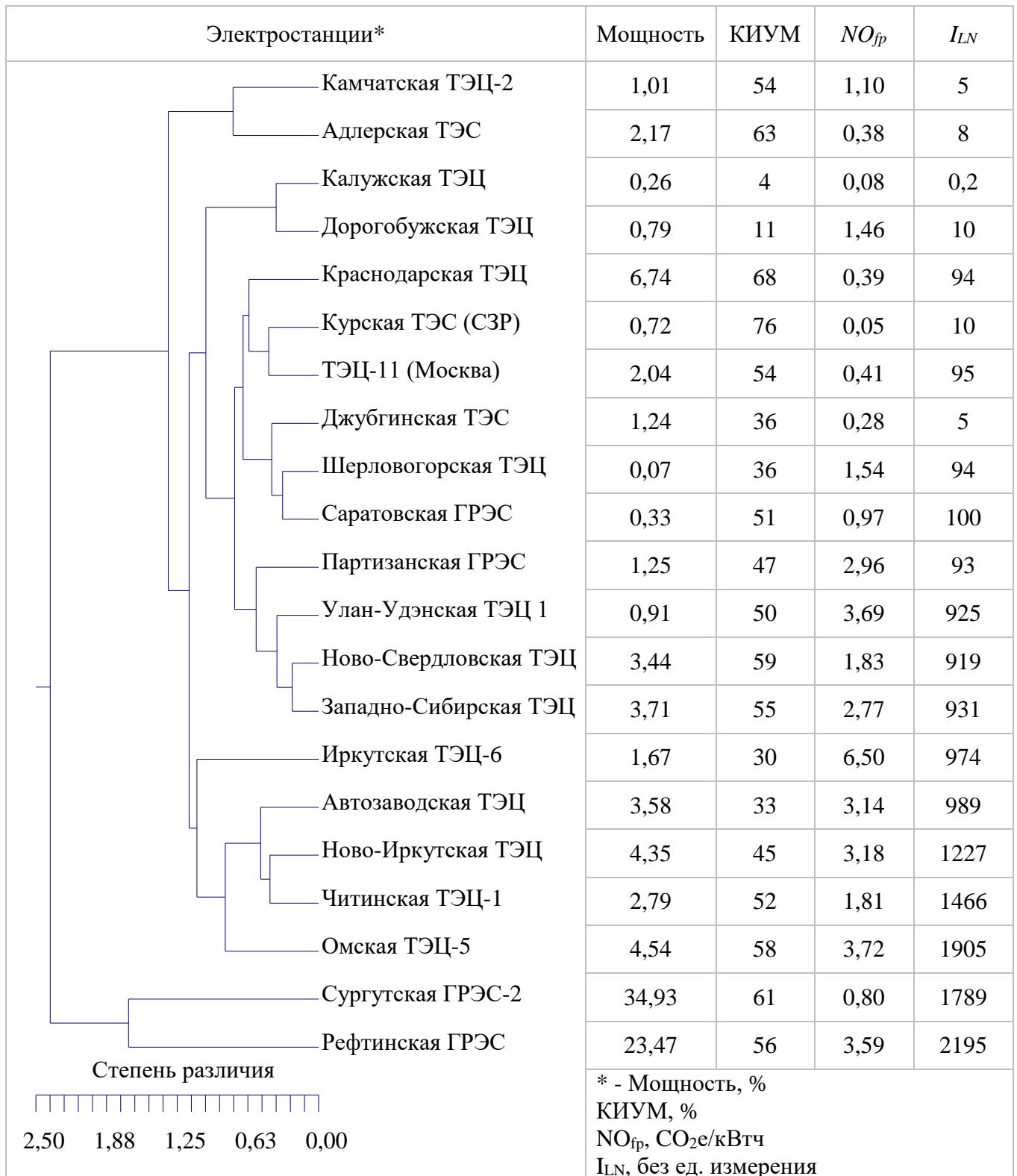


Рисунок 5.6. Кластерный анализ 21 представительных объектов тепловой энергетики с оценкой удельного веса основных факторов дифференциации показателей азотной нагрузки

В наиболее информативные кластеры объединились: Сургутская ГРЭС-2 и Рефтинская ГРЭС; Читинская ТЭЦ-1 и Ново-Иркутская ТЭЦ; Камчатская ТЭЦ-2 и Адлерская ТЭС; Калужская ТЭЦ и Дорогобужская ТЭЦ. В результатах кластерного анализа прослеживается аналогия с результатами экологической оценки по уровню азотной нагрузки на наземные экосистемы из таблицы 5.4.

5.8. Экологическая оценка азотного следа объектов тепловой энергетики

Проведенная экологическая оценка удельного азотного следа объектов тепловой энергетики показала, что в России с 1990 года начался общий тренд на снижение выбросов оксидов азота от стационарных источников которых, однако, по результатам 2017 – 2020 годов снова показал незначительный рост.

Результаты расчета азотного следа тепловых электростанций NO_{fp} в соотношении с индексом азотной нагрузки показали четкую дифференциацию объектов, относящиеся к разным технологическим группам (ГРЭС, угольные ТЭЦ, газовые ТЭЦ). Более высокий уровень азотного следа NO_{fp} имеют в основном угольные и мазутные старые электростанции невысокой мощности, значительная часть которых имеет низкие показатели КИУМ.

Предложенный индекс азотной нагрузки позволил дифференцировать степень азотной нагрузки ТЭС на локальные наземные экосистемы с выделением 5 групп нагрузки: чрезвычайно высокой, очень высокой, высокой, средней и допустимой, что дает возможность оценить текущее состояние ассимиляционных способностей наземных экосистем, поскольку для многих из них ассимиляционные способности превышены в тысячи раз. Состояние абсолютного большинства наземных экосистем, находящихся в зонах непосредственного воздействия ТЭС вызывает серьезную обеспокоенность. Единственной экологически безопасной с точки зрения выбросов антропогенного азота ТЭС оказалась газовая Калужская ТЭЦ (индекс $I_{LN} = 0,2$). В целом азотная нагрузка на наземные экосистемы имеет куда более значительные показатели ($\max I_{LN} = 2195,1$), чем углеродная нагрузка ($\max I_{LC} = 20,5$).

Для снижения азотной нагрузки ТЭС на наземные экосистемы целесообразно осуществление модернизации котельного оборудования ТЭС с целью снижения удельного количества выбросов оксидов азота на 25 %. Многие ТЭС уже сейчас активно переводятся на более экологичное газовое топливо. Вместе с тем наиболее предпочтительной задачей остается оптимизация режимов работы действующих объектов тепловой энергетики, чем строительство новых, что представляется особенно актуальным в связи планируемым к 2035 году вводом в эксплуатацию новых ТЭС суммарной мощностью 84,6 ГВт (Схема территориального планирования Российской Федерации в области энергетики, 2016). Важное значение имеет экологический мониторинг в зонах влияния выбросов антропогенного азота, которые могут достигать до 80 км. В случаях, когда крупные объекты тепловой энергетики находятся в непосредственной близости от сельскохозяйственных земель, на которых осуществляется производство сельскохозяйственной продукции, антропогенное поступление азота должно учитываться при планировании системы применения удобрений.

По аналогии с ранее проведенной оценкой углеродного следа наличие большого количества лесных экосистем в непосредственной близости от многих объектов тепловой энергетики позволяют говорить о частичной компенсации повышенного поступления антропогенных оксидов азота в зоне прямого воздействия большинства наиболее мощных тепловых электростанций в России.

ГЛАВА 6. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО И АЗОТНОГО СЛЕДА ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ МОСКВЫ

6.1. Региональные особенности климата Москвы

Межгодовая динамика изменения климата Москвы имеет сезонный циклический характер и особенности межгодовых изменений на фоне общего тренда среднегодового потепления (рис. 6.1), которая может быть связана с выбросами парниковых газов природного и антропогенного происхождения. Это можно проиллюстрировать на примере линейного тренда температуры приземного слоя атмосферного воздуха в Москве, составленного по данным наблюдений с 1881 г. метеорологической обсерватории имени В.А. Михельсона в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева 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 °С, а температура холодного и летнего периодов соответственно на 3,18 °С и 1,12 °С (Исаев и др., 2002).

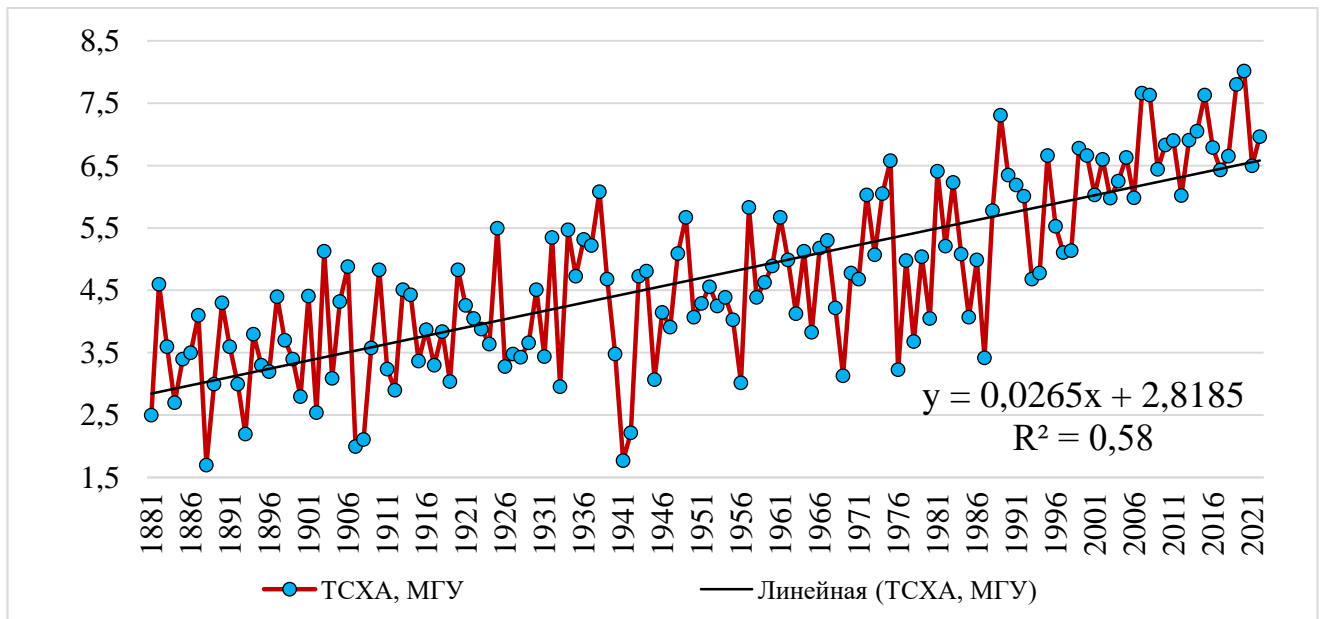


Рисунок 6.1. Межгодовые изменения среднегодовой температуры воздуха в Москве 1881 – 2022 г. по данным РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева и МГУ им М.В. Ломоносова

Данные метеорологических наблюдений свидетельствуют о том, что в последние десятилетия на территории Москвы и Московской области наметился значительный рост средней годовой температуры воздуха и количества опасных природных явлений. В 2021 году между тем, средняя годовая температура воздуха была ниже нормы и составила + 6,5 °С, при этом выпало 844 мм осадков.

Новая экологическая политика Москвы на период до 2030 года (ПП Москвы от 10.07.2014 № 394-ПП) закрепила основные цели, принципы, содержание и пути реализации единой государственной политики в области климата. Одним из приоритетных вопросов климатической политики Москвы является сокращение выбросов парниковых газов, что соответствует общемировым целям устойчивого развития. К другим ключевым ориентирам и принципам новой экологической политики города относится обеспечение поэтапного перехода к энергоэффективной и низкоуглеродной экономике в целях снижения «углеродного следа» города.

Вопросы оптимизации деятельности энергетической инфраструктуры становятся чрезвычайно актуальными в условиях цифровой трансформации городского хозяйства. К концу 2021 года в Москве установлено около 200 зарядных станций для электромобилей, к 2023 году будет установлено еще 600 (Проект «Энергия Москвы», 2022). Летом 2023 года осуществлён запуск маршрутов речного круглогодичного электротранспорта, в результате чего в Москве прогнозируется дополнительная потребность в электроэнергии.

6.2. Экологический анализ электробаланса Москвы

По результатам анализа электробаланса Москвы за 2005 – 2022 годы (табл. 6.1) выявлено увеличение общего потребления электроэнергии с 46,7 до 60 млрд. кВтч (на 28 %). При этом рост производства электроэнергии за аналогичный период составил всего около 5 %. За 2022 год производство электроэнергии составило более 54 млрд. кВтч (4,7 % от показателя по РФ), потребление электроэнергии составило 60 млрд. кВтч (5,2 % от общего показателя РФ).

Таблица 6.1. Электробаланс Москвы за 2005-2022 годы (млрд. кВтч)

Год	Произведено эл-ии	Получено из-за пределов в РФ	Потреблено эл-ии	Электропотребление по видам деятельности									Отпущено за пределы РФ	Среднегодовая t воздуха °С
				А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И		
2005	51,7	-	46,7	17,2	-	1,0	-	2,7	-	8,6	10,6	6,5	5,0	6,63
2006	53,9	-	48,3	17,9	-	1,0	-	3,3	-	8,5	11,3	6,2	5,6	5,98
2007	54,1	-	49,3	20,0	-	1,0	-	3,3	-	8,3	11,8	4,9	4,8	7,66
2008	52,8	-	51,7	19,3	-	1,1	-	3,4	-	13,6	9,4	4,9	1,1	7,63
2009	49,8	-	49,8	17,5	-	1,0	-	3,5	-	13,7	9,5	4,7	-	6,44
2010	52,0	-	52,0	16,1	-	0,7	-	3,4	-	17,0	9,9	4,8	-	6,83
2011	53,0	-	53,0	16,3	-	1,1	-	3,3	-	16,6	10,5	5,2	-	6,90
2012	51,5	2,1	53,6	16,4	0,1	1,1	4,6	3,6	-	11,3	11,4	5,0	-	6,02
2013	47,6	7,2	54,8	14,9	0,2	1,2	4,7	3,9	-	12,1	13,2	4,7	-	6,91
2014	47,1	8,0	55,1	14,4	0,3	1,2	4,8	4,7	-	11,9	13,3	4,6	-	7,05
2015	46,1	8,3	54,5	14,4	0,2	1,3	4,8	3,9	-	12,6	12,7	4,5	-	7,63
2016	50,5	5,0	55,5	15,6	0,1	1,3	4,2	3,9	-	12,9	13,2	4,2	-	6,79
2017	49,0	7,7	56,6	16,5	0,3	1,4	4,2	3,8	0,5	12,1	13,4	4,5	-	6,43
2018	50,9	5,8	56,7	13,0	0,2	1,2	2,8	4,1	0,5	18,1	12,4	4,3	-	6,65
2019	52,0	4,6	56,6	11,2	0,3	1,2	2,9	4,3	0,6	19,1	12,9	4,1	-	7,80
2020	48,2	4,5	52,7	10,4	0,3	1,1	2,1	4,2	1,3	18,6	11,1	3,6	-	8,02
2021	54,7	4,1	58,8	11,7	0,2	1,3	2,5	4,5	1,9	20,4	12,3	3,9	-	6,50
2022	54,5	5,5	60,0	11,7	0,2	1,5	2,5	4,7	2,3	20,9	12,5	3,6	-	6,97

* где, А – добыча полезных ископаемых, обрабатывающие производства, обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха; водоснабжение; водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений. В – Сельское хозяйство, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство. С – Строительство; Д – торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов. Е – Транспортировка и хранение. Ф – Деятельность в области информации и связи. Г – Другие виды экономической деятельности. Н – Городское и сельское население. И – потери в электросетях.

Рост количества потребляемой электроэнергии произошел за счет отраслей транспорта «Е» (на 69 %), информационных технологий «F» (в 4,7 раза), и других видов экономической деятельности «G» (в 2,4 раза). Под другими видами экономической деятельности в соответствии с актуальными кодами ОКВЭД (ОК 029-2014. КДЕС Ред. 2, 2022) подразумеваются различные сферы услуг:

- деятельность гостиниц и предприятий общественного питания;
- финансовая и страховая деятельность;
- деятельность по операциям с недвижимым имуществом;
- деятельность профессиональная, научная и техническая;
- деятельность административная и сопутствующие дополнительные услуги;
- государственное управление и обеспечение военной безопасности;
- образование;
- деятельность в области здравоохранения и социальных услуг;
- деятельность в области культуры, спорта, организации досуга и развлечений.

По состоянию на 2022 год электробаланс Москвы является дефицитным, как и начиная с 2012 года (рис. 6.2).

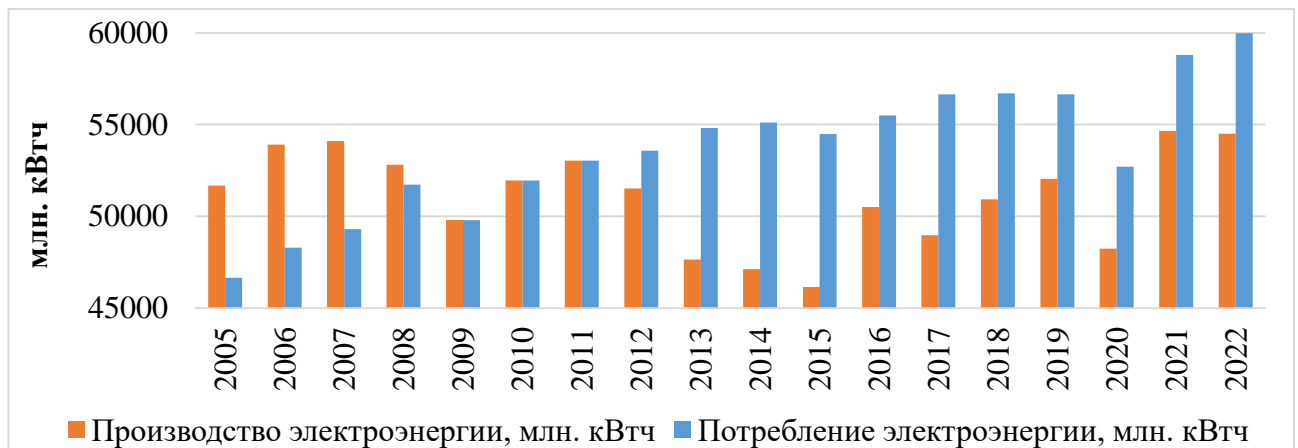


Рисунок 6.2. Динамика производства и потребления электроэнергии в Москве (без ТЭЦ-22 и ТЭЦ-27), млн. кВтч 2005-2022 гг. (Электробаланс РФ, 2022)

Для обеспечения цифровой трансформации сферы услуг потребуется дополнительное энергоснабжение. Активный рост электропотребления в данном секторе начался с 2018 года. Потери в электросетях «I» за рассматриваемый период сократились на 44 %, что говорит о положительных результатах деятельности

московских генерирующих и электросетевых компаний по модернизации основного оборудования.

Важно отметить увеличение удельного значения количества потребляемой в Москве электроэнергии для отраслей экономики: транспортировка и хранение «Е», деятельность в области информации и связи» «F», другие виды экономической деятельности «G» в общем показателе. На фоне этого произошло снижение на 32 % (с 17,1 млрд. кВтч в 2005 году до 11,6 м в 2022 году) количества потребляемой электроэнергии в промышленной отрасли «А», включая самообеспечение ТЭЦ, а также на 45 % в отрасли оптовой и розничной торговли «D».

Отдельный интерес представляет сектор городское население «Н», в котором за рассматриваемый период отмечен рост потребления электроэнергии на 18 % с одновременным снижением удельного веса показателя с 14 % в 2005 году до 6,6 % в 2022 года в основном за счет секторов «Е», «F» и «G».

В целом показатели электробаланса Москвы свидетельствуют о наметившейся с 2012 года постепенной перестройке городского хозяйства в целях осуществления цифровой трансформации городского хозяйства (рис. 6.3).

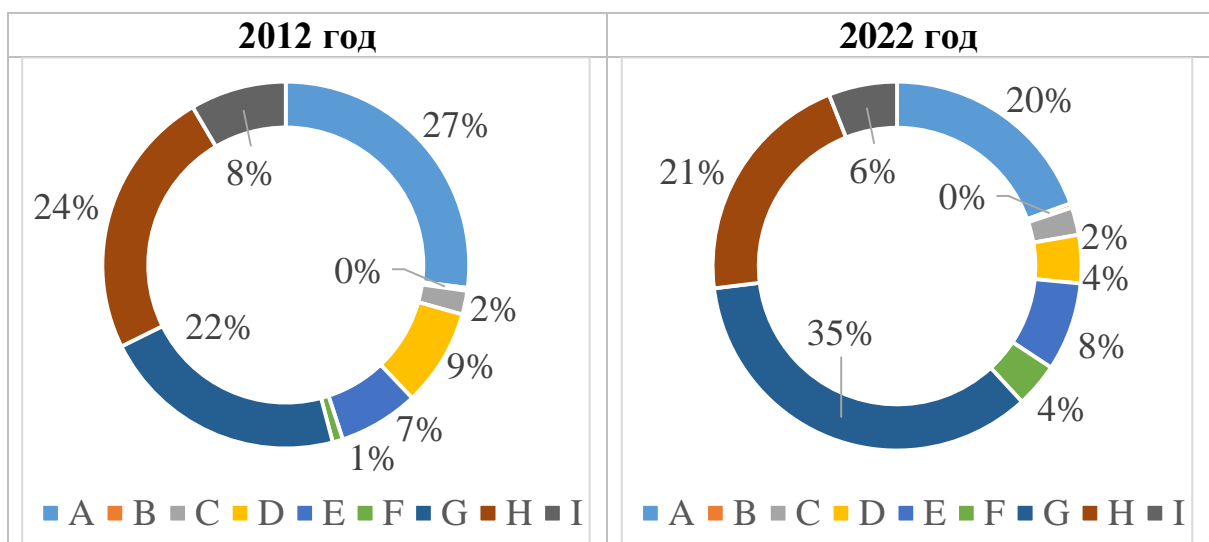


Рисунок 6.3. Удельный вес электропотребления по видам экономической деятельности в 2012 и 2022 году %* (Электробаланс РФ, 2022)

*А – добыча полезных ископаемых, обрабатывающие производства, обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха; водоснабжение; водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений. В – Сельское хозяйство, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство. С – Строительство; D – торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов. Е – Транспортировка и хранение. F – Деятельность в области информации и связи. G – Другие виды экономической деятельности. Н – Городское и сельское население. I – потери в электросетях.

6.3. Экологическая оценка выбросов ТЭЦ Москвы

Наибольший вклад в «углеродный след» Москвы от стационарных источников вносят объекты тепловой энергетики, которые имеют важное значение в социально-экономическом развитии города. Выбросы парниковых газов и других загрязняющих веществ, образующихся в результате их производственной деятельности, оказывают негативное воздействие на урбанизированные экосистемы города и здоровье человека (Артамонов, Гутников, 2019).

Общие выбросы загрязняющих веществ в 2021 году составили 59,6 тыс. тонн. Основными источниками загрязнения в Москве являются тепловые электростанции (ТЭЦ, РТС) ПАО «Мосэнерго» и районные и квартальные тепловые станции (РТС и КТС) ПАО «МОЭК» (Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2022 году»). При этом динамика выбросов загрязняющих веществ на объектах ПАО «Мосэнерго», расположенных на территории Москвы, за период 2000-2021 имеет выраженный тренд на снижение, который описывается степенной функцией $y = 53398x^{-0,231}$ с коэффициентом детерминации: $R^2 = 0,67$ (рис. 6.4).

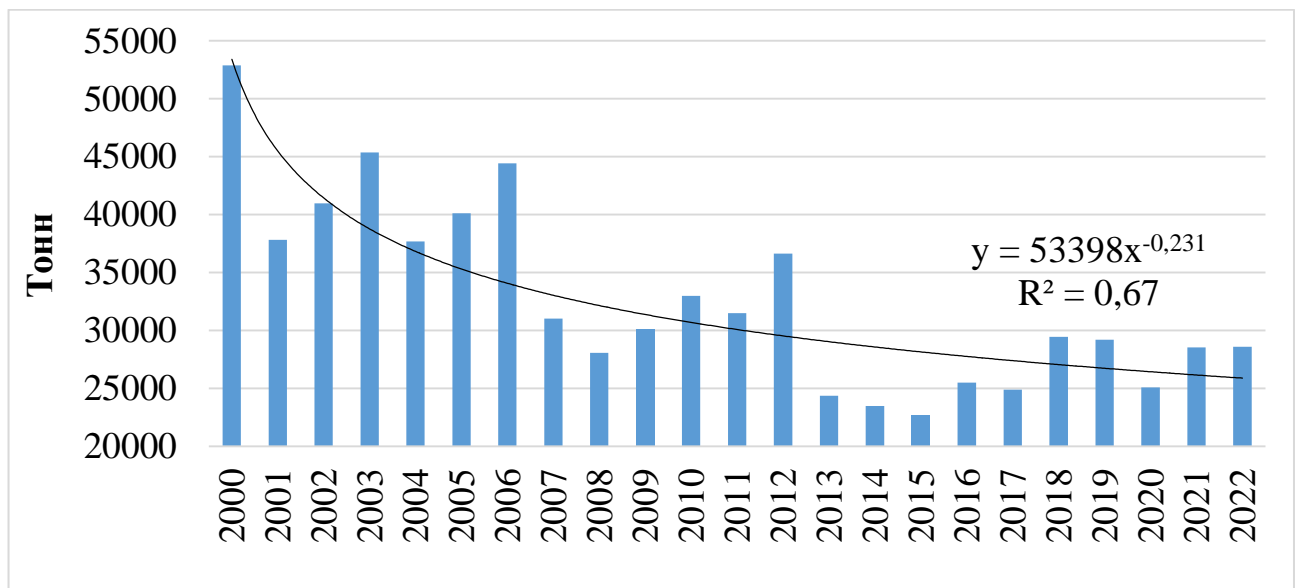


Рисунок 6.4. Динамика выбросов загрязняющих веществ на объектах ПАО «Мосэнерго» (без ТЭЦ-22 и ТЭЦ-27), тонн 2000-2022 гг.

По сравнению с 2012 годом снижение общего количества загрязняющих веществ в 2022 году составило 10 % (рис. 6.5). Наибольшее снижение отмечается

по выбросам диоксида серы и оксидам углерода. Наиболее распространенными выбросами, загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников, за 2022 год являются оксиды азота (NO_x), летучие органические соединения (ЛОС) и оксид углерода (CO). При этом сернистый ангидрид SO_2 и диоксид азота NO_2 согласно ГОСТ 12.1.007-76 относятся к III классу опасности по степени воздействия на организм человека («умеренно-опасное химическое вещество»).

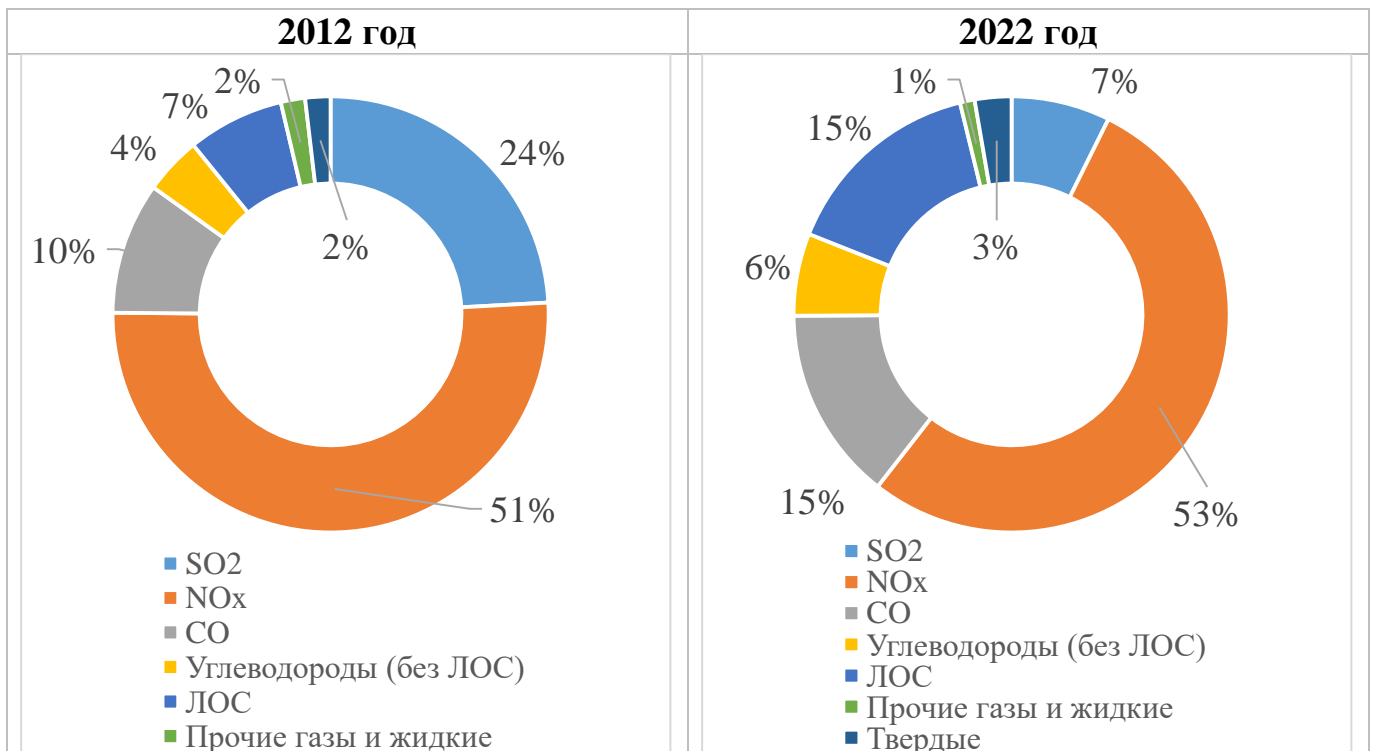


Рисунок 6.5. Основные выбросы загрязняющих веществ в Москве от стационарных источников в 2012 и 2022 году (Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2022 году»)

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 (табл. 6.2).

Таблица 6.2. Показатели деятельности ТЭЦ Москвы за 2020 г.

Название	Основные производственные и экологические показатели*													
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
ГЭС-1	76	183	36	27,5	159,1	224	0,03	29,6	352	15,5	0,084	0,043	1,919	81,7
ТЭЦ-8	580	1930	215	38,0	246,7	907	0,1	40,6	878	35,0	0,018	0,071	0,455	148,7
ТЭЦ-9	275	988	108	41,1	242,7	421	0,004	35,2	318	23,2	0,023	0,054	0,322	62,2
ТЭЦ-11	330	1644	175	56,9	223,8	713	21,6	46,5	566	28,9	0,018	0,051	0,345	83,9
ТЭЦ-12	612	2843	305	53,1	206,7	1131	6	45,4	1552	71,7	0,025	0,130	0,546	235,2
ТЭЦ-16	651	3643	292	63,9	168,4	1161	0,05	48,4	734	76,9	0,021	0,131	0,201	104,3
ТЭЦ-20	1108	5692	471	58,7	206,9	1902	8,2	63,8	2264	127,0	0,022	0,164	0,398	244,2
ТЭЦ-21	1765	7954	683	51,4	183,2	3175	8,8	93,8	4814	303,6	0,038	0,266	0,605	353,1
ТЭЦ-22	1070	5101	514	54,4	227,9	2560	-	383,3	5289	11,9	0,002	0,003	1,037	95,0
ТЭЦ-23	1420	7313	583	58,8	226,1	3052	9,5	78,1	2947	21,1	0,003	0,022	0,403	259,8
ТЭЦ-25	1370	6705	510	55,9	218,4	2718	0,3	87,4	2957	111,3	0,017	0,105	0,441	232,9
ТЭЦ-26	1841	9890	696	61,3	213,0	3484	39,1	93,3	4624	953,1	0,096	0,840	0,468	341,2
ТЭЦ-27	1060	5953	250	64,1	201,4	1691	-	167,7	888	0,3	0,0001	0,000	0,149	36,4
Международная	236	1436	72	69,4	198,4	290	-	32,8	506	66,9	0,047	0,168	0,352	106,3
Терешково	170	1511	94	80	237,7	391	-	35,5	316	3 063	2,027	7,094	0,209	61,3
Коломенское	136	437	29	36,7	239,7	173	-	30,0	246	53,8	0,123	0,148	0,563	56,5

* Примечание: C1 – Электрическая мощность, МВт; C2 – Годовое производство электроэнергии, млн. кВтч; C3 – Расход э/э на собственные нужды, млн. кВтч; C4 – КИУМ, %; C5 – У.Р.У.Т., г у.т./кВтч; C6 – Годовой расход условного топлива, тыс. т у.т. (Газ); C7 – Годовой расход условного топлива, тыс. т у.т. (Мазут); C8 – Территория непосредственного воздействия, га; C9 – Выбросы NO₂, тонн; C10 – Выбросы CO₂, тонн; C11 – GHG_{fp}, г. CO₂е/кВтч; C12 – Индекс (I_{LC}); C13 – NO₂_{fp}, г. NO₂/кВтч; C14 – Индекс (I_{LN}).

Так, наибольшую установленную мощность имеет ТЭЦ-26 (1840 МВт), которая также вырабатывает наибольшее количество электроэнергии в год (9890 млн. кВтч). ТЭС «Международная» и ТЭЦ-27 имеют наиболее высокие показатели коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ) (69 и 64 % соответственно). ТЭЦ-8 имеет самые высокие показатели удельного расхода условного топлива на производство электроэнергии (УРУТ) – 246,7 г.у.т./кВтч, что говорит о самой низкой среди рассматриваемых объектов энергетики эффективности сжигания топлива на единицу произведённой электроэнергии.

ТЭЦ-22 является единственной электростанцией, позволяющей использовать в качестве топлива не только природный газ, но и уголь, однако за последние годы его доля в топливном балансе заметно снизилась. ТЭЦ-22 имеет самую большую зону непосредственного воздействия – 383 га, кроме того, вблизи нее находится золоотвал площадью 75 га, характерный для ТЭЦ, работающих на твёрдом топливе. Наибольшее количество общих выбросов загрязняющих веществ имеет ТЭЦ-26 и ТЭЦ-21 (6799,2 и 5348,1 тонн соответственно). При этом ТЭЦ-22 имеет наибольшие показатели выбросов NO₂ – 5289 тонн, а ТЭС «Герешково» имеет наибольшие показатели выбросов CO₂ – 3063 тонн.

По данным ПАО «Мосэнерго» наиболее экологически чистой электростанцией является ТЭЦ-27, которая изначально была спроектирована как производственный объект, оказывающий минимальное воздействие на окружающую среду. Сегодня ее по праву можно считать одной из самых экологически чистых электростанций в Европе (Вести «Мосэнерго», 2022). Строительство электростанции началось в 1987 году, а первый энергоблок станции введен в эксплуатацию в 1996 году. На ТЭЦ используются энергоблоки типа ПГУ-450. В состав входят две газотурбинные установки типа ГТЭ-160, два вертикальных котла-утилизатора и паровая турбина. Эксплуатация высокоэффективных парогазовых установок обеспечивает суммарный КПД до 52% и позволяет экономить до 30% газа по сравнению с традиционным паросиловым оборудованием. Кроме того, использование парогазовой технологии позволяет

сократить количество вредных выбросов в атмосферу. ТЭЦ-27 расположена в городском округе Мытищи Московской области. Электростанция обеспечивает теплом и электроэнергией более миллиона потребителей Северного и Северо-Восточного округов столицы, а также города Мытищи. В качестве основного и резервного топлива используется природный газ.

Произведен расчет углеродного и азотного следа с оценкой углеродной и азотной нагрузки, наибольший углеродный след ($GHG_{fp} - 2,027$ г. $CO_2e/кВтч$) и индекс углеродной нагрузки ($I_{LC} - 7,094$, группа высокой углеродной нагрузки) имеет ТЭС «Терешково». Наибольший азотный след имеет ГЭС-1 ($NO_{fp} - 1,919$ г. $NO_2/кВтч$), 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. 6.3).

Таблица 6.3. Анализ 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

Необходимо отметить, что Московские ТЭЦ располагаются в урбанизированных экосистемах, большая часть из которых покрыта

асфальтированными и другими водонепроницаемыми покрытиями, которые также характеризуются низким экологическим потенциалом к самовосстановлению поскольку значительные лесные площади, позволяющие говорить о компенсирующем воздействии, 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 (Полякова, Гутников, 2000).

6.4. Взаимосвязи производственных и экологических показателей ТЭЦ

По результатам статистического анализа производственных и экологических показателей объектов тепловой энергетики Москвы за 2020 год (табл. 6.4) выбросы CO_2 имеют высокую корреляцию с производством электроэнергии ($r = 0,627$), годовым расходом условного топлива (мазут) ($r = 0,815$), индексом углеродной нагрузки (I_{LC}) ($r = 0,985$) и индексом азотной нагрузки ($r = 0,653$). В случае с выбросами NO_2 отмечается высокая корреляция с производством электроэнергии ($r = 0,818$), годовым расходом условного топлива (газ) ($r = 0,906$), площадью территории непосредственного воздействия ($r = 0,640$), индексом азотной нагрузки ($r = 0,701$).

Также выявлена тесная корреляционная зависимость между установленной мощностью и производством электроэнергии ($r = 0,988$), расходом электроэнергии на собственные нужды ($r = 0,945$), расходом условного топлива (газ) ($r = 0,969$).

Индекс углеродной нагрузки имеет тесную корреляционную связь с расходом условного топлива (мазут) ($r = 0,805$). Индекс азотной нагрузки имеет тесную корреляционную связь с установленной мощностью ($r = 0,799$), производством электроэнергии ($r = 0,758$), расходом электроэнергии на собственные нужды ($r = 0,837$), расходом условного топлива (газ) ($r = 0,771$).

При этом показатели углеродного следа, азотного следа и удельного расхода условного топлива не имеют ярко выраженных корреляционных зависимостей между собой.

Отмечены различия коэффициентов корреляции производства электроэнергии с экологическими показателями при анализе в разрезе электростанций и в разрезе административных округов города (табл. 6.5).

Таблица 6.5. Анализ влияния производства электроэнергии на основные технологические и экологические показатели взаимосвязей в разрезе ТЭЦ и административных округов

<i>Показатели</i>	Коэф. корреляции (ТЭЦ)	Коэф. корреляции (Адм. Округа)
Установленная мощность, МВт	0,988	0,983
Расход э/э на собственные нужды, млн. кВтч	0,945	0,922
КИУМ, %	0,535	-0,407
Годовой расход условного топлива (Газ), т.у.т	0,969	0,955
Территория непосредственного воздействия, га	0,377	0,288
Выбросы CO ₂	0,628	0,610
Выбросы NO ₂	0,827	0,768
<i>GHG_{fp}</i> ,	-0,200	-0,543
<i>I_{LC}</i>	0,529	0,467
<i>NO_{fp}</i> ,	-0,261	-0,124
<i>I_{LN}</i>	0,751	0,541

6.5. Типизация ТЭЦ Москвы по производственным и экологическим показателям

Иерархический кластерный анализ проведенный по показателям: электрическая мощность, годовое производство электроэнергии, расход условного топлива, КИУМ, площадь территории непосредственного воздействия, выбросы CO₂, *GHG_{fp}*, *I_{LC}*, выбросы NO₂, *NO_{fp}*, *I_{LN}* показал, что ТЭЦ сгруппировались по производственным показателям и показателям выбросов загрязняющих веществ, которые в свою очередь определяют антропогенную нагрузку на наземные экосистемы, находящиеся в зоне непосредственного воздействия ТЭЦ (рис. 6.6).

Наиболее отличной от остальных оказалась ТЭС «Терешково», которая имеет наибольшие показатели выбросов CO₂, углеродного следа и индекса углеродной нагрузки. Также выделяются ТЭС-1 и ТЭЦ-22. Уникальность этих станций обусловлена высокими показателями азотного следа.

Наибольшую углеродную нагрузку на наземные экосистемы оказывает ТЭС «Терешково», что обусловлено очень высоким показателем выбросов CO₂ на фоне

относительно невысоких показателей годичного обновления органического углерода в наземных экосистемах в зоне непосредственного воздействия (C_{Ta}).

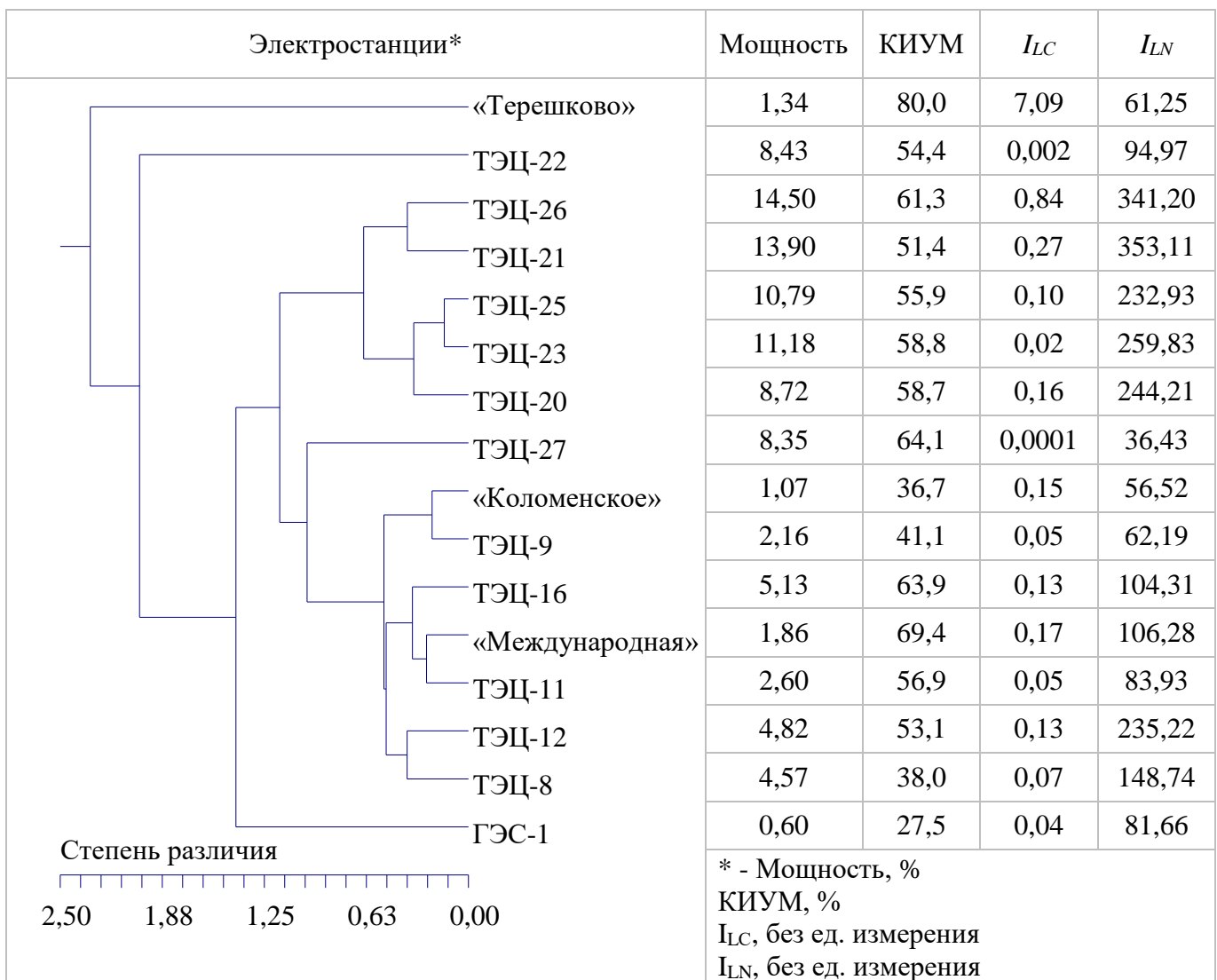


Рисунок 6.6. Кластерный анализ московских ТЭЦ с оценкой основных факторов дифференциации углеродной и азотной нагрузки

Наибольшую азотную нагрузку на наземные экосистемы оказывают ТЭЦ-26 и ТЭЦ-21, которые объединились в один кластер, что обусловлено очень высокими показателями выбросов NO_2 на фоне относительно невысоких показателей годичного обновления органического азота в наземных экосистемах в зоне непосредственного воздействия ТЭС (N_{Ta}).

В наиболее информативные кластеры объединились: ТЭЦ-26 и ТЭЦ-21; ТЭЦ-25 и ТЭЦ-23; ТЭЦ-8 и ТЭЦ-12; ТЭЦ-9 и ТЭС «Коломенское», что обусловлено близкими производственными показателями.

6.6. Оценка ассимиляционного потенциала ООПТ Москвы по стоку антропогенного углерода и азота от выбросов ТЭЦ

Естественные природные территории являются наиболее значимыми для сохранения биоразнообразия и в отличие от искусственно-функционирующих территорий, выполняют большее количество экологических функций, повышающих качество жизни в городе. Они снижают негативные воздействия от выбросов загрязняющих веществ, формируют мезо- и микроклимат города. ООПТ Москвы – это уникальные природные сообщества, представленные 200-летними сосняками, смешанными лесными массивами, водно-болотными угодьями и речными долинами. На территории московских ООПТ обитает 573 вида краснокнижных животных, растений и грибов, в том числе 128 видов сосудистых растений, 25 видов моховидных, 3 вида водорослей, 35 видов лишайников, 32 вида грибов, 24 вида млекопитающих, 88 видов птиц, 6 видов пресмыкающихся, 8 видов земноводных, 16 видов рыб и 208 таксонов беспозвоночных (Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2022 году»).

На 01.01.2023 года на территории города расположено 136 ООПТ (19,5 тыс. га), наиболее крупными из которых являются Национальный парк «Лосиный остров» площадью 3090,6 га (ООПТ федерального значения), природно-исторический парк «Москворецкий» и природно-исторический парк «Битцевский лес» (ООПТ регионального значения) (табл. 6.6). Общая площадь особо охраняемых территории Москвы составляет 19 702,99 га или 7,5 % от общей площади города.

Таблица 6.6. Количество и площадь занимаемая ООПТ в г. Москве

Категории ООПТ	Количество ООПТ	Общая площадь, га
Национальный парк	1	3 090,6
Природно-исторические парки	11	11 830,6
Природные заказники	27	3 798,3
Памятники природы в составе ООПТ иной категории	72	496,82
Памятники природы вне границ ООПТ иной категории	31	334,56
Экологический парк	2	144,91
Заповедный участок	1	7,2
Итого	145	19 702,99

Для оценки ассимиляционного потенциала наземных экосистем ООПТ к поглощению выбросов антропогенного углерода и азота, образующегося в результате производства электроэнергии на 16 исследуемых московских ТЭЦ, рассчитаны запасы органического углерода и азота в фитомассе и почвенном покрове наземных экосистем, а также индексы углеродной и азотной нагрузки по ранее предложенным формулам (табл. 6.7 и табл. 6.8).

Таблица 6.7. Ассимиляционный потенциал московских ООПТ по стоку антропогенного углерода от выбросов ТЭЦ

Показатель	Значение
Запасы фитомассы, кг/м ² (B_o)	65,48
Запасы гумуса в почве кг/м ² (H_o)	6,80
Запасы органического углерода в фитомассе (C_B), кг	6 450 758 926
Запасы органического углерода в почвенном покрове (C_S), кг	777 200 202,9
Усреднённый показатель годичного обновления углерода в фитомассе (C_{Ba}), кг/год	64 507 589,3
Усреднённый показатель годичного обновления углерода в почвенном покрове (C_{Sa}), кг/год	777 200,2
Суммарный показатель годичного обновления органического углерода в наземных экосистемах в зоне непосредственного воздействия ТЭС (C_{Ta}), кг/год	65 284 789,5
Выбросы антропогенного углерода от выбросов ТЭС ($C-CO_2$), кг/год	1 354 966,4
Индекс углеродной нагрузки (I_{LC})	0,021
Выбросы антропогенного углерода ($C-CO_2$) от выбросов ТЭС на единицу площади ООПТ Москвы, кг/га	68,7

Таблица 6.8. Ассимиляционный потенциал московских ООПТ по стоку антропогенного азота от выбросов ТЭЦ

Показатель	Значение
Запасы фитомассы, кг/м ² (B_o)	65,48
Запасы гумуса в почве кг/м ² (H_o)	6,80
Запасы органического азота в фитомассе (N_B), кг	82 702 038
Запасы органического азота в почвенном покрове (N_S), кг	9 964 105
Усреднённый показатель годичного обновления азота в фитомассе (N_{Ba}), кг/год	827 020,4
Усреднённый показатель годичного обновления азота в почвенном покрове (N_{Sa}), кг/год	9 964,1
Суммарный показатель годичного обновления органического азота в наземных экосистемах в зоне непосредственного воздействия ТЭС (N_{Ta}), кг/год	836 984,5
Выбросы антропогенного азота от выбросов ТЭС ($N-NO_2$), кг/год	8 933 966,5
Индекс азотной нагрузки (I_{LN})	10,67
Выбросы антропогенного азота ($N-NO_2$) от выбросов ТЭС на единицу площади ООПТ Москвы, кг/га	453,4

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. Для компенсации избытков поступающего антропогенного азота требуется дополнительно не менее 297 777 га наземных экосистем, что даже превышает площадь всей территории Москвы (256 150 га).

6.7. Экологическая оценка прогнозируемых значений выбросов ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

На расчетный 2035 год электроснабжение и теплоснабжение города предусматривается от 1025 источников энергии суммарной электрической мощностью – 11,1 ГВт, тепловой 62 768 Гкал/ч. На территории города без учета ТиНАО (803 источника суммарной тепловой мощностью 55 499,4 Гкал/ч, электрической – 11 071 МВт). На территории ТиНАО (322 источника суммарной тепловой мощностью 7 268,7 Гкал/ч, электрической – 47 МВт).

Основным видом топлива, используемого для производства электрической и тепловой энергии, практически для всех объектов тепловой энергетики Москвы на перспективу до 2035 г. является природный газ, доля которого в суммарном топливном балансе составит около 99,7%, доля биогаза – 0,19%, мазута – 0,035%, дизельного топлива – 0,0006%, угля – менее 0,00002%.

В ПАО «Мосэнерго» ведется планомерная работа по снижению и контролю выбросов парниковых газов, а также уделяется повышенное внимание вопросам охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов:

– выполнение мероприятий по переводу ТЭЦ-22 на сжигание газа и мазута на всех котельных агрегатах с применением топливного режима: основное и резервное топливо – природный газ, аварийное топливо – мазут;

- обновление на котлах ТЭЦ автоматизированных систем контроля фактических выбросов загрязняющих веществ (NO , NO_2 , CO , SO_2) и оптимизация процесса горения на основе многокомпонентных газоанализаторов;
- расширение автоматизированной системы экологического мониторинга на ТЭЦ с передачей данных в ГУП «Мосэкомониторинг». Контроль выбросов SO_2 от дымовых труб энергетических котлоагрегатов и NO , NO_2 , CO – водогрейных котлов;
- реконструкция схемы рециркуляции дымовых газов на энергетических котлоагрегатах ТЭЦ в целях снижения выбросов NO_x ;
- замена оборудования с приближающимся окончанием ресурса на оборудование с наилучшими доступными технологиями – рециркуляция дымовых газов, ступенчатое сжигание топлива, малотоксичные горелки;
- модернизация, техническое перевооружение автоматизированной системы управления технологическим процессом;
- техническое перевооружение энергетических и водогрейных котлов с заменой горелочных устройств;
- модернизация и реконструкция градирен на ТЭЦ;

Согласно официальным прогнозным значениям производственных показателей ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» к 2035 году ожидается увеличение производства электроэнергии на 23 %, увеличение производства теплоэнергии на 32 %, а также увеличение показателя коэффициента используемой установленной мощности (КИУМ) практически на всех электростанциях (табл. 6.9).

Выявленные взаимосвязи между экологическими и производственными показателями позволяют прогнозировать на среднесрочную перспективу уровень выбросов NO_2 и азотного следа для определения мероприятий по оптимизации антропогенной нагрузки на наземные экосистемы в условиях г. Москвы.

**Таблица 6.9. Прогнозные значения производственных показателей
ТЭЦ «Мосэнерго» на 2035 год**

Название	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, Гкал/ч	Производство электроэнергии, млн. кВтч	Расход условного топлива, тыс. т у.т. (Газ)	Расход условного топлива, тыс. т у.т. (Мазут)
ГЭС-1	86	691	200	209,3	2,1
ТЭЦ-8	580	1 892	2 496	1 214,7	12,3
ТЭЦ-9	274	575	1 118	525,5	0,5
ТЭЦ-11	330	1 011	2 142	876,9	27,1
ТЭЦ-12	611	1 914	3 757	1 411,9	7,1
ТЭЦ-16	651	1 408	4 908	1 472,9	0,1
ТЭЦ-20	985	2 310	6 650	2 266,2	9,8
ТЭЦ-21	1 789	4 963	10 035	3 947,9	11,1
ТЭЦ-22	1 385	3 678	6 786	3 292,3	0,7
ТЭЦ-23	1 461	4 605	8 975	3 716,4	11,6
ТЭЦ-25	1 377	4 103	9 019	3 667,6	0,4
ТЭЦ-26	1 850	4 202	11 363	3 994,2	44,8
ТЭЦ-27	1 060	1 876	6 279	1 922,2	0,8

Формулы могут быть актуализированы по мере накопления ежегодно обновляемых данных. Высокие коэффициенты детерминации (R^2) в выведенной формуле множественной регрессии позволяют вести мониторинг расчетных показателей с достаточно высокой точностью. Коэффициент вариации составляет: 0,3317. Среднеквадратичная ошибка: 517033,8 (табл. 6.10). Отмеченные закономерности наиболее очевидно демонстрируются в случае с антропогенным азотом.

Таблица 6.10. Описание расчетной формулы выбросов NO₂

Тесты нормальности		тестовое значение	вероятное значение
01	Шапиро Уилк	0,9549	0,674616
02	Андерсон Дарлинг	0,3259	0,521419
03	Асимметрия Д'Агостино	-1,2899	0,197094
04	Экссесс Д'Агостино	1,1972	0,231218
05	Омнибус Д'Агостино	3,0971	0,212552

Так, расчетный показатель выбросов NO₂ в атмосферу от ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» определяется по формуле (6.1), результаты расчёта в сравнении с фактическими выбросами за 2020 год представлены на рисунке 6.7.

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

Где,

E_{NO_2} – Выбросы NO_2 , тонн;

E_{gen} – производство электроэнергии, млн. кВтч;

H_{gen} – производство тепловой энергии тыс. Гкал; Gas – расход газа, млн. м³.

Общие выбросы NO_2 с учетом областных ТЭЦ-22 и ТЭЦ-27 за 2020 г. составили 28 тыс. тонн. К 2035 году, согласно расчетным данным, выбросы NO_2 увеличатся на 28 %, и составят 36 тыс. тонн, что на 4 тыс. тонн меньше официального прогноза ПАО «Мосэнерго» – 40 тыс. тонн. Прогнозируется значительное увеличение количества выбросов NO_2 к 2035 году на ТЭЦ- 8, ТЭЦ-23 и ТЭЦ-25.

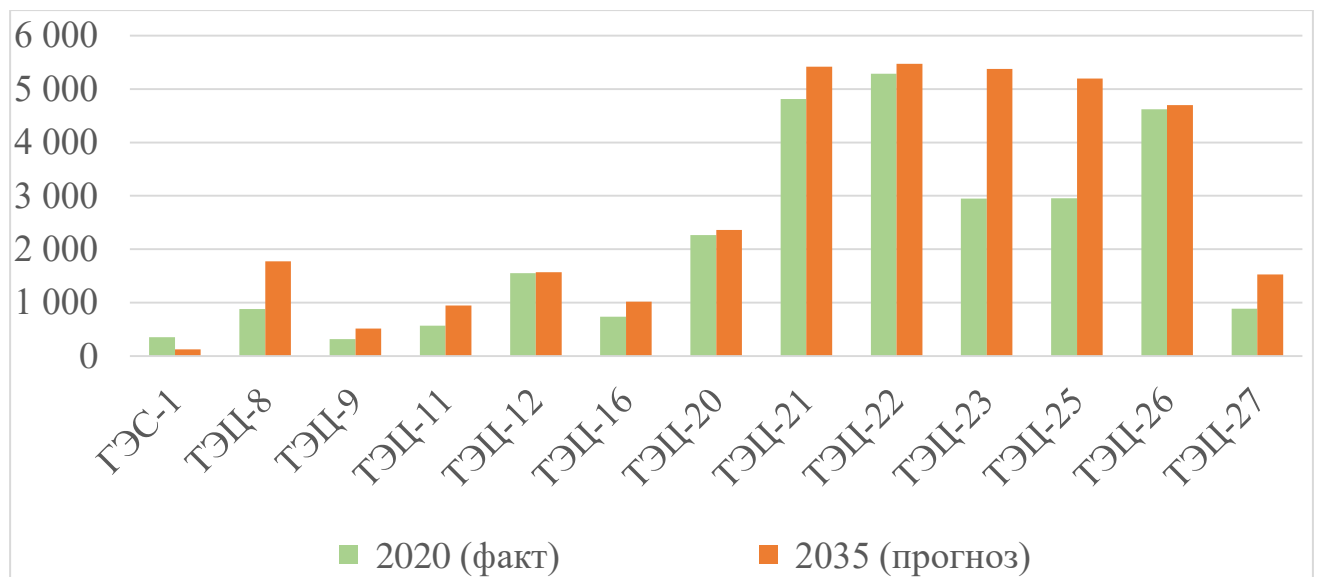


Рисунок 6.7. Выбросы NO_2 на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» за 2020 г. и прогнозные значения на 2035 г., тонн

По прогнозным данным выбросов NO_2 произведен расчет азотного следа и индекса азотной нагрузки и осуществлено сравнение полученных значений с фактическими данными за 2020 год (табл. 6.11).

В результате проведенного исследования установлено, что электробаланс Москвы начиная с 2012 года является дефицитным, при этом цифровая трансформация требует дополнительное энергоснабжение. В связи с чем обсуждается вопрос о целесообразности производства электроэнергии на территории города, поскольку получение дополнительной электроэнергии из других регионов РФ связано с увеличением ее стоимости и рисками потерь в

электросетях, что актуализирует вопросы анализа экологической безопасности производства электроэнергии в городе.

Таблица 6.11. Анализ азотного следа ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

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

Прогнозируется увеличение выбросов NO₂ на объектах ПАО «Мосэнерго» к 2035 году несмотря на все проводимые природоохранные мероприятия. Имеется тенденция на увеличение азотного следа для большинства рассматриваемых ТЭЦ ПАО «Мосэнерго», ситуация с азотной нагрузкой выглядит еще серьезнее, только ГЭС-1 имеет показатель ниже значения 2020 года.

Наибольший азотный след прогнозируется для ТЭЦ-22 – 0,806 г. NO₂/кВтч, имеющей наибольшие показатели выбросов NO₂ среди ТЭЦ ПАО «Мосэнерго». Наибольший индекс азотной нагрузки прогнозируется для ТЭЦ-23 – 473,9. При этом необходимо отметить низкий экологический потенциал к самовосстановлению урбанизированных экосистем поскольку значительные лесные площади, позволяющие говорить о компенсирующем воздействии, расположены на значительных расстояниях. Парки и зеленые зоны Москвы, имеющие ограниченные ассимиляционные способности ввиду недостаточных площадей, не позволяют скомпенсировать повышенное поступление антропогенного азота от ТЭЦ. Данная ситуация вызывает серьезную обеспокоенность в связи с тем, что в настоящее время в Москве осуществляется комплекс мер по цифровой трансформации городского хозяйства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная экологическая оценка углеродного и азотного следа объектов тепловой энергетики в условиях Российской Федерации 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.

В результате исследования сформулированы следующие выводы.

1. В России с 1990 года отмечается общий тренд на снижение выбросов CO_2 и 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 сохранению 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 (КИУМ 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, находящихся 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 0,806 г. NO₂/кВтч, наибольший индекс азотной нагрузки может достигать 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. CO_{2e}/кВтч, при целевом значении – менее 100 г. CO_{2e}/кВтч).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллина, Л.Р. Обзор методик расчета углеродного следа / Л.Р. Абдуллина, А.И. Подольский // Высокие технологии и инновации в науке: сборник избранных статей Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 28 мая 2020 года. – Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие», 2020. – С. 80-82.
2. Агроэкологическая оценка депонирования CO₂ почвами сухостепной зоны / А.Е. Сорокин, В.И. Савич, В.Н. Жуланова [и др.] // Плодородие. – 2021. – № 2 (119). – С. 65-67.
3. Алексашина, В.В. Стратегия развития мировой энергетики и проблемы Биосферосовместимости / В.В. Алексашина // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2013. – № 2(2). – С. 17-27.
4. Алехнович, А.Н. Снижение выбросов углекислого газа на ТЭС / А.Н. Алехнович // Библиотечка электротехника. – 2022. – № 6(282). – С. 5-89.
5. Алисов, Б.П. Климатология: учеб. пособие / Б.П. Алисов, Б.В. Полтараус. - М.: Изд-во МГУ, 1974. – 299 с.
6. Антанайтис В.В., Загреев В.В. / Прирост леса - 2-е изд., перераб. – М.: Лесн. пром-сть, 1981. – 200 с.
7. Анучин Н.П. Лесная таксация: Учебник для вузов / Н.П. Анучин, акад. - 5-е изд., испр. и доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. - 552 с.
8. Аракелян, Э.К. Оптимизация режимов оборудования ТЭЦ с учетом экологических ограничений / Э.К. Аракелян, В.И. Кормилицын, В.Н. Самаренко // Теплоэнергетика. – 1992. – № 2. – С. 29-33.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.

14. Артамонов, Г.Е. Агроэкосистемы для объектов тепловой энергетики / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Достижения науки и техники АПК. – 2018. – Т. 32. – № 8. – С. 21-24.

15. Артамонов, Г.Е. Моделирование воздействия объектов тепловой энергетики города Москвы на экосистемы / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Экология урбанизированных территорий. – 2019. – № 2. – С. 62-68.

16. Артамонов, Г.Е. Экологическая оценка азотного следа объектов тепловой энергетики в Российской Федерации / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников, И.И. Васенев // Проблемы региональной экологии. – 2022. – № 4. – С. 5-15.

17. Артамонов, Г.Е. Экологическая оценка влияния выбросов оксидов азота от объектов тепловой энергетики на азотный цикл в локальных наземных экосистемах / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Градостроительство. – 2020. – № 3(67). – С. 35-41.

18. Артамонов, Г.Е. Экологическая оценка воздействия объектов тепловой энергетики на ландшафты / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Природа и общество: интеграционные процессы: Материалы международной научно-практической конференции, Севастополь, 12–16 сентября 2022 года / Ред. Е.А. Позаченюк [и др.]. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2022. – С. 267-272.

19. 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. – 2019. – № 6. – С. 125-133.

20. Артамонов, Г.Е. Экологическая оценка по критериям "зеленых проектов" для объектов тепловой энергетики Российской Федерации / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников, И.И. Васенев // Проблемы региональной экологии. – 2022. – № 1. – С. 74-83.

21. Артамонов, Г.Е. Экологические аспекты энергетической стратегии Российской Федерации / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 4. – С. 106-112.

22. Артамонов, Г.Е. Экологические принципы оптимизации воздействия объектов энергетики на экосистемы / Г.Е. Артамонов, В.А. Гутников // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2018. – № 2(22). – С. 16-26.

23. Базилевич, Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии / Н.И. Базилевич; Институт географии РАН. – Москва: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук «Издательство «Наука», 1993. – 293 с.

24. Бекиров, Э.А. Экологические аспекты деятельности ТЭС. Расчет выбросов и воздействие ТЭС на окружающую среду (на примере Сакской ТЭС) /

Э.А. Бекиров, А.Н. Абибуллаев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2013. – № 38. – С. 91-97.

25. Белик, И.С. Оценка влияния антропогенного воздействия на ассимиляционную способность территории / И.С. Белик, Н.В. Стародубец, С.В. Карелов // Экономика и предпринимательство. – 2013. – № 11(40). – С. 321-326.

26. Белик, И.С. Оценка угроз ассимиляционному потенциалу территории от антропогенного воздействия / И.С. Белик, Н.В. Стародубец, Д.Н. Шуткина // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. – 2013. – № 5. – С. 131-139.

27. Белова, С.Б. Углеродный след: проблемы и пути решения / С. Б. Белова, И.Ю. Старчикова, Е.С. Старчикова // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 3(105). – С. 19-21.

28. Биогеохимический круговорот веществ в биосфере: [Сб. ст.] / АН СССР, Науч. совет по пробл. почвоведения и мелиорации почв, Ин-т почвоведения и фотосинтеза; Отв. ред. В.А. Ковда. - Москва: Наука, 1987. - 141 с.

29. Биоклиматический потенциал России: меры адаптации в условиях изменяющегося климата / А.Д. Клещенко, Б.А. Черняков, О.Д. Сиротенко [и др.]; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ВНИИ сельскохозяйственной метеорологии Росгидромета Института США и Канады Российской Академии наук, ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова РАСХН, Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, Агрофизический институт РАСХН, под редакцией а. – Москва: Российская академия сельскохозяйственных наук, 2008. – 206 с.

30. Биоклиматический потенциал России: методы мониторинга в условиях изменяющегося климата / А.Д. Клещенко, Б.А. Черняков, О.Д. Сиротенко [и др.]; Под редакцией А.В. Гордеева, Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ВНИИ сельскохозяйственной метеорологии Росгидромета, Института США и Канады Российской академии наук, ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова РАСХН, Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, Агрофизический институт РАСХН. – Москва: Типография Россельхозакадемии, 2007. – 236 с.

31. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности: / А.А. Титлянова, Н.И. Базилевич, В.А. Снытко [и др.]. – 2-е издание, исправленное и дополненное. – Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии С, 2018. – 110 с.

32. Биомы России: Масштаб 1:7 500 000 / Г.Н. Огуреева, Н.Б. Леонова, Е.В. Булдакова [и др.]; Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова; Русское географическое общество; Всемирный фонд дикой природы (WWF). – Издание второе, переработанное и дополненное. – Москва: Всемирный фонд природы, 2018. – 1 с. – (Для высших учебных заведений).

33. Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы / Г.Н. Огуреева, Н.Б. Леонова, И.М. Микляева [и др.]. – Москва: Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля", 2020. – 623 с.

34. Букварева, Е. Экосистемные услуги ландшафтов России / Е. Букварева, Д. Замолотчиков, К. Грюневальд // Новые методы и результаты исследований

ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири: Монография. В 5 томах / Под редакцией В.Г. Сычева, Л. Мюллера. Том I. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2018. – С. 57-61.

35. Бушуев, В.В. Климат и энергопереход: взаимодействие и взаимозависимость / В.В. Бушуев, Д.А. Соловьев // Энергетическая политика. – 2021. – № 11(165). – С. 44-55.

36. Бюллетень ВМО по парниковым газам, 2022 год [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.un.org/ru/climatechange/reports>.

37. Вершинин, Н.В. Основные пути и методы снижения выбросов оксидов азота / Н.В. Вершинин, А.В. Шкорботов, А.В. Рязанцева // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 68-2. – С. 134-136.

38. Возможные пути снижения выбросов углекислого газа / А.М. Гафуров, Б.М. Осипов, Р.З. Гатина, Н.М. Гафуров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19. – № 9-10. – С. 21-31.

39. Возраст и эволюция черноземов / Н.Я. Марголина, А.Л. Александровский, Б.А. Ильичев и др.; Отв. ред. В.О. Таргульян; АН СССР, Ин-т географии. - М.: Наука, 1988. – 142 с.

40. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: В 3-х томах / Г.В. Алексеев, М.Д. Ананичева, О.А. Анисимов [и др.]; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Том 1. – Москва: Росгидромет, 2014. – 1008 с.

41. Гербер А.А., Лойко С.В., Кулижский С.П. Механизмы накопления органического углерода в мерзлотных почвах южной тундры Западной Сибири //Третья открытая конференция молодых ученых Почвенного института имени В.В. Докучаева «Почвоведение: горизонты будущего. 2019»: сб. кратких тез., 13-15 февр. 2019 г. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2019. С. 45-46.

42. Герцык, С.И. Оценка содержания оксидов азота в продуктах горения газообразных топлив / С.И. Герцык, И.В. Беляков // Электротехнология. – 2020. – № 4. – С. 34-40.

43. Глазовский, Н.Ф. Избранные труды: в двух томах / Н.Ф. Глазовский; Российская акад. наук, Ин-т географии РАН;. – Москва: Товарищество науч. изд. КМК, 2006. – 25 с.

44. Годовой отчет ПАО «Мосэнерго» за 2021 г. Утвержден годовым общим собранием акционеров ПАО «Мосэнерго» 29.06.2022 (Протокол от 04.07.2022 № 1/2022). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://mosenergo.gazprom.ru/investors/reports/>.

45. Голубева, Е.И. Атласное картографирование производственных процессов наземных экосистем России / Е.И. Голубева, Т.В. Котова, Н.И. Тульская // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 5. – С. 8-12.

46. ГОСТ 12.1.007-76*. Государственный стандарт Союза ССР. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие

требования безопасности" (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 10.03.1976 № 579) / М.: Госстандарт СССР, 1985.

47. ГОСТ 17.8.1.01-86 (СТ СЭВ 5303-85). «Государственный стандарт Союза ССР. Охрана природы. Ландшафты. Термины и определения» (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 19.12.1986 N 4182).

48. ГОСТ 19431-84. Энергетика и электрификация. Термины и определения (введен в действие постановлением Госстандарта СССР от 24.03. 1984 № 1029). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200005816?section=text>.

49. ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 30.09.2021 № 1029-ст) / М.: ФГБУ "РСТ", 2021.

50. ГОСТ Р ИСО 14064-2-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Газы парниковые. Часть 2. Требования и руководство по количественному определению, мониторингу и составлению отчетной документации на проекты сокращения выбросов парниковых газов или увеличения их поглощения на уровне проекта» / М.: ФГБУ "РСТ", 2021.

51. ГОСТ Р ИСО 14064-3-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Газы парниковые. Часть 3. Требования и руководство по валидации и верификации заявлений в отношении парниковых газов» / М.: ФГБУ "РСТ", 2021.

52. ГОСТ Р ИСО 14067-2021 Газы парниковые. Углеродный след продукции. Требования и руководящие указания по количественному определению / М.: ФГБУ "РСТ", 2021.

53. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году». – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. – 684 с.

54. Грачев, В.А. Глобальные экологические проблемы, экологическая безопасность и экологическая эффективность энергетики / В.А. Грачев, О.В. Плямина // Век глобализации. – 2017. – № 1(21). – С. 86-97.

55. Гудилин И.С. Ландшафтная карта СССР / И.С. Гудилин. – М.: Министерство геологии СССР, Гидроспецгеология, 1980. – Масштаб 1:2500000.

56. Гутников, В.А. Природно-ресурсный потенциал и ландшафтная модель для стратегии пространственного развития / В.А. Гутников // Градостроительство. – 2015. – № 4(38). – С. 53-62.

57. Данилов-Данильян, В.И. О глобальной климатической проблеме и заблуждениях при её трактовке / В.И. Данилов-Данильян // Человек в глобальном мире: риски и перспективы / Российская академия наук, Институт философии. – Москва: Канон+, 2021. – С. 32-41.

58. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2022 году» / Под ред. А.О. Кульбачевского. – Москва, 2022. – 281 с.

59. Доклад ВМО: Единство в науке, 2022 год [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://public.wmo.int/en/resources/united_in_science.

60. Доклад ВМО: Предварительное состояние глобального климата в 2022 году [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.un.org/ru/climatechange/reports>.

61. Доклад ВМО: Состояние услуг в области климата: энергетика, 2022 год [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11340.

62. Дубовицкий, А.А. Особенности применения систем автономного электроснабжения на примере ДЭС / А.А. Дубовицкий // Комплексные и отраслевые проблемы науки и пути их решения: сборник статей Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 25 апреля 2020 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2020. – С. 19-21.

63. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0 / И.О. Алябина, В.А. Андроханов, В.В. Вершинин. П.М. Сапожников [и др.]. – Москва: Гриф и К, 2014. – 768 с.

64. Ежегодник «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2021 г.», 2022, ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» г. Санкт-Петербург 2022 – 253с.

65. Загреев В.В. / Географические закономерности роста и продуктивности древостоев. М.: Лесная промышленность, 1978. – 240 с.

66. Закон г. Москвы от 08.10.1997 № 40-70 «О наименовании территориальных единиц, улиц, элементов планировочной структуры и станций метрополитена города Москвы»: офиц. текст. – «Ведомости Московской Думы», 1998, № 1.

67. Закон города Москвы от 05.07.1995 № 13-47 «О территориальном делении города Москвы»: офиц. текст. – «Вестник Мэра и Правительства Москвы», № 22, 13.04.2012.

68. Замолодчиков, Д.Г. Углеродный цикл и изменения климата / Д.Г. Замолодчиков // Окружающая среда и энергосведение. – 2021. – № 2(10). – С. 53-69.

69. Иваницкий, А.Д. Сургутские ГРЭС-1 и ГРЭС-2: История и современность / А.Д. Иваницкий, Н.В. Юрченко // УСТОЙЧИВОЕ развитие РОССИИ - 2022: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции, Петрозаводск, 12 декабря 2022 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2022. – С. 233-239.

70. Иващенко, А.С. Охрана атмосферного воздуха на МУП «Тепловая компания» Исилькульского городского поселения Омской области / А.С. Иващенко, О.В. Нежевляк // Каталог выпускных квалификационных работ факультета агрохимии, почвоведения, экологии, природообустройства и водопользования. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021. – С. 239-241.

71. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (ИТС 38-2022). Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» (утв. Приказом Росстандарта от 20.12.2022 № 3227) – М.: Бюро НДТ, 2022.

72. Исаев, А.А. Научно-прикладной справочник по климату Москвы. Серия 2 / А.А. Исаев, В.А. Гутников, Б.Г. Шерстюков; Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. Геогр. фак. Метеорол. Обсерватория Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2002. – 156 с.: ил., табл.

73. Исаченко А.Г. Ландшафты СССР/А.Г. Исаченко. – Л.: Издательство ЛГУ, 1985. – 320 с.

74. Исаченко, А.Г. Избранные труды (К 90-летию со дня рождения). – СПб.: ВВМ, 2012. – 486 с.

75. ИТС 38-2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» (утв. Приказом Росстандарта от 22.12.2017 № 2929) – М.: Бюро НДТ, 2017.

76. Кайбичева, А.В. Анализ экологических и производственных рисков на объектах предприятия «Юргинская ТЭЦ» / А.В. Кайбичева, О.Д. Лукашевич // Избранные доклады 68-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 19–23 апреля 2022 года. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. – С. 176-178.

77. Карасевич, В.А. Направления оптимизации углеродных выбросов нефтегазовых компаний России / В.А. Карасевич, К.А. Меликова, С.Д. Чердынцева // Нефтяная провинция. – 2022. – № 1(29). – С. 49-60.

78. Карпачевский, Л.О. Курс лесного почвоведения: учебное пособие / Л.О. Карпачевский, Ю.Н. Ашинов, Л.В. Березин. – Майкоп: Аякс, 2009. – 348 с.

79. Карпачевский, Л.О. Почва и биологическое разнообразие / Л.О. Карпачевский // Почвоведение. – 2012. – № 6. – С. 710.

80. Карпачевский, Л.О. Циклы углерода на территории России / Л.О. Карпачевский // Почвоведение. – 2008. – № 9. – С. 1129-1131.

81. Карта растительности СССР (для высших учебных заведений). Масштаб 1:4 000 000. М.: ГУГК, 1990.

82. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (подписан в г. Киото 11.12.1997): офиц. текст – Собрание Законодательства РФ. 7 марта 2005 г. № 10. Ст. 764.

83. Кисельчук, А.А. Роль лесной отрасли России в снижении углеродного следа / А.А. Кисельчук, В.В. Беспалова // Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: Сборник статей XX Международной научно-практической конференции, Пенза, 20–21 января 2022 года / Под редакцией В.А. Селезнева, И.А. Лушкина. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 104-107.

84. Климова, А.Ю. Особенности трансформации соединений азота и углерода в олиготрофной торфяной почве / А.Ю. Климова, А.Л. Степанов, Н.А. Манучарова // Почвоведение. – 2019. – № 10. – С. 1198-1202.

85. Козловский В.Б., Павлов В.М. Ход роста основных лесобразующих пород СССР (Справочник). М: Лесная промышленность», 1967. – 327 с.

86. Конвенция о биологическом разнообразии» (Вместе с «Определением и мониторингом», «Процедурой арбитражного разбирательства», «Согласительной

процедурой») (Заключена в г. Рио-де-Жанейро 05.06.1992): офиц. текст. – Бюллетень международных договоров. 1996. № 9. С. 3-28.

87. Кононова, Н.К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX-XXI столетиях и их последствия для климата / Н. К. Кононова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – Т. 1. – С. 133-162.

88. Конференции ООН по вопросам изменения климата в Глазго (КС-26). Меры по борьбе с изменением климата. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.un.org/ru/climatechange/cop26>.

89. Концепция г. Москвы «Умный город – 2030» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://2030.mos.ru>.

90. Корпоративная газета «Вести Мосэнерго». Спецвыпуск № 3, 2022 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://mosenergo.gazprom.ru/d/journal/51/81/vesti-mosehnergo-spetsvypusk-tehts-27-30-let.pdf?ysclid=lk54cl3pyl651162770>.

91. Кочуров, Б.И. Экологические критерии и показатели территориального планирования города / Б.И. Кочуров, И.В. Ивашкина // Проблемы региональной экологии. – 2010. – № 4. – С. 24-32.

92. Кудеяров, В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России / В.Н. Кудеяров // Агрохимия. – 2019. – № 12. – С. 3-15.

93. Кудеяров, В.Н. Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России / В.Н. Кудеяров // Агрохимия. – 2018. – № 10. – С. 3-11.

94. Кудеяров, В.Н. Углеродный баланс наземных экосистем на территории России к 25-летию принятия рамочной конвенции ООН об изменении климата / В.Н. Кудеяров // Вестник Российской академии наук. – 2018. – Т. 88. – № 2. – С. 179-183.

95. Лагода, Р.А. Углеродный след: главный экологический вопрос человечества / Р.А. Лагода // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 79-2. – С. 13-16.

96. Математическое моделирование земной системы / Е.М. Володин, В.Я. Галин, А.С. Грицун [и др.]. – Москва: ООО "МАКС Пресс", 2016. – 328 с.

97. Мауричева, Т.С. Основные положения количественной оценки радиоактивного воздействия угольных ТЭЦ на окружающую среду / Т.С. Мауричева, Г.П. Киселев // Вестник Поморского университета. Серия: Естественные и точные науки. – 2006. – № 1. – С. 110-114.

98. Методические указания по диагностике органического углерода, азота, нефтепродуктов и состава гумусовых веществ в почве / И.М. Яшин, И.И. Васенев, Р. Валентини, В.А. Черников. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2012. – 131 с.

99. Мищенко, Н.В. Динамика органического углерода в почвенно-растительном покрове речного бассейна / Н.В. Мищенко, Т.А. Трифонова, С.А. Шоба, Е.П. Быкова // Экология речных бассейнов: Труды 10-й Международной научно-практической конференции, Владимир, 21 сентября 2021 года – 22 2022

года / Под общей редакцией Т.А. Трифионовой. – Владимир: Общество с ограниченной ответственностью "Аркаим", 2021. – С. 423-429.

100. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / А.С. Комаров, О.Г. Чертов, М.А. Надпорожская [и др.]; Российская академия наук, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения. – Москва: Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр "Наука", 2007. – 380 с.

101. Моисеев, Б.Н. Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомах России / Б.Н. Моисеев, И.О. Алябина // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2007. – № 5. – С. 116-127.

102. Мосина, Л.В. Экология (модульный курс): Учебное пособие для высших учебных заведений агрономического и агротехнологического профилей / Л.В. Мосина, Э.А. Довлетярова. – Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН), 2020. – 122 с.

103. Национальный атлас почв Российской Федерации / Н.А. Аветов, А.Л. Александровский, И.О. Алябина [и др.]. – Москва: Издательство «Астрель», 2011. – 632 с.

104. Национальный атлас России: В 4 томах / И.Г. Авенариус, А.Л. Александровский, В.А. Артамонов [и др.]; Министерство экономического развития, Федеральное агентство геодезии и картографии; главный редактор тома Ю.А. Веденин; в разработке специализированного содержания карт и текстового материала принимали участие: М.А. Полякова (раздел "Культурное и природное наследие России"), В.П. Козлов (раздел "Современная культура"). Том 4. – Москва: Роскартография, 2008. – 495 с.

105. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2020 гг. в 2 томах. – М.: 2022.

106. Национальный мониторинг органического углерода в почвах России: проблемы, решения и перспективные исследования. Когут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н., Кириллова Н.П., Фрид А.С. В книге: Почвы – стратегический ресурс России, тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв. Сыктывкар, 2021. С. 142-143.

107. Неведров, Н.П. Экологическая оценка почвенных потоков диоксида углерода при различных видах воздействия на почвы сосновых насаждений г. Курска / Н.П. Неведров // Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию НИЛ экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики БГУ, Минск, 09–11 ноября 2022 года / Редколлегия: Д.С. Воробьев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Белорусский государственный университет, 2022. – С. 401-404.

108. Нестеренко, Н.Ю. Подходы к оценке углеродного следа сельского хозяйства в Российской Федерации и Евросоюза / Н.Ю. Нестеренко // АПК: экономика, управление. – 2022. – № 3. – С. 19-28.

109. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021. – М.: Росгидромет, 2022. – 220 с.

110. Общероссийский классификатор видов экономической деятельности ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2) (утв. Приказом Росстандарта от 31.01.2014 № 14-ст). Официальный текст – официальный интернет-портал правовой информации <http://www.pravo.gov.ru>, 14.08.2022.

111. Основы прикладной экологии: Воздействие человека на биосферу / Франсуа Рамад; Пер. с фр. под ред. Л. Т. Матвеева. - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - 543 с.

112. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2022 году. Подготовлен в соответствии с «Правилами разработки и утверждения схем и программ перспективного развития электроэнергетики» (утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 17.10.2009 № 823) [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.so-ups.ru.

113. Панина, А. Климатическая повестка: версия 2.0 / А. Панина // Энергетическая политика. – 2021. – № 6(160). – С. 12-23.

114. Парижское соглашение (Заключено в г. Париже 12.12.2015): официальный текст – официальный интернет-портал правовой информации <http://www.pravo.gov.ru>, 06.07.2013.

115. Пархоменко, Н.А. Мониторинг углеродного следа с использованием материалов дистанционного зондирования / Н.А. Пархоменко, Е.А. Кошева // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития: Сборник научных трудов по материалам III международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию юбилею доктора экономических наук, профессора Ю.М. Рогатнева, Омск, 13 мая 2021 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021. – С. 68-73.

116. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности / И.Н. Курганова, Д.Г. В.О. Лопес, С.Л. Ипп [и др.] // Почвы и окружающая среда. – 2022. – Т. 5, № 2.

117. План электрификации РСФСР: Доклад VIII съезду Советов Государственной комиссии по электрификации России / (Вступ. статья акад. Г.М. Кржижановского). - 2-е изд. М.: Госполитиздат, 1955. - 660 с.

118. Полякова, Г.А. Парки Москвы: экология и флористическая характеристика / Г.А. Полякова, В.А. Гутников. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство ГЕОС", 2000. – 406 с.

119. Послание Президента РФ Федеральному Собранию от 21.04.2021 «Послание Президента Федеральному Собранию»: официальный текст – «Российская газета», № 87, 22.04.2021.

120. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 25.09.2007 № 74 «О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03

«Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов»: офиц. текст. – «Российская газета», № 28, 09.02.2008.

121. Постановление Правительства Москвы от 02.12.2008 № 1075-ПП «Об Энергетической стратегии города Москвы на период до 2025 года»: офиц. текст. – «Вестник Мэра и Правительства Москвы», № 68, 09.12.2008.

122. Постановление Правительства Москвы от 10.07.2014 № 394-ПП «Об основных положениях новой экологической политики города Москвы на период до 2030 года»: офиц. текст. – «Вестник Мэра и Правительства Москвы», № 39, 15.07.2014.

123. Постановление Правительства РФ от 20.04.2022 № 707 «Об утверждении Правил представления и проверки отчетов о выбросах парниковых газов, формы отчета о выбросах парниковых газов, Правил создания и ведения реестра выбросов парниковых газов и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации»: офиц. текст – Официальный интернет-портал правовой информации <http://pravo.gov.ru>, 21.04.2022.

124. Постановление Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации»: офиц. текст – «Собрание законодательства РФ», 04.10.2021, № 40, ст. 6818.

125. Потапов, И.И. Моделирование глобального цикла азота / И.И. Потапов, В.Ф. Крапивин // Экологические системы и приборы. – 2010. – № 9. – С. 45-52.

126. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 02.11.2022 № 1183 «Об утверждении актуализации схемы теплоснабжения города Москвы на период до 2035 года (актуализация на 2023 год)». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mos.ru/dgkh/documents/skhemy/view/277392220/>.

127. Приказ Минприроды России от 18.04.2018 № 154 «Об утверждении перечня объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, относящихся к I категории, вклад которых в суммарные выбросы, сбросы загрязняющих веществ в Российской Федерации составляет не менее чем 60 процентов»: офиц. текст. – документ опубликован не был.

128. Приказ Минстроя России от 30.12.2016 № 1034/пр «Об утверждении СП 42.13330 «СНиП 2.07.01-89* Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений»: офиц. текст. – «Информационный бюллетень о нормативной, методической и типовой проектной документации», № 7, 2017.

129. Проблемы обеспечения экологической безопасности региона / В.В. Куценко, Э.С. Цховребов, С.Н. Сидоренко [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 2. – С. 75-82.

130. Проект «Энергия Москвы». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://transport.mos.ru/electro>.

131. Промышленное производство в России. 2021: Стат. сб. / Росстат. – М., 2021. – 305 с.

132. Пространственное распределение тяжелых металлов в почвах, законсервированных золоотвалов ТЭЦ / А.О. Константинов, Е.Ю. Константинова, А.А. Новоселов, Минкина Т.М. [и др.] // Проблемы загрязнения объектов окружающей среды тяжелыми металлами: труды международной конференции, Тула, 28–30 сентября 2022 года. – Тула: Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2022. – С. 65-69.

133. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский [и др.]. – Москва: Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр "Наука", 2007. – 315 с.

134. Пчелина, Н.С. Сравнительный анализ воздействия атмосферных выбросов атомной и тепловой электростанций на лесные экосистемы: специальность 03.00.16: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пчелина Наталья Станиславовна. – Москва, 2009. – 16 с.

135. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (Заключена в г. Нью-Йорке 09.05.1992): офиц. текст – Бюллетень международных договоров. 1996. № 12. С. 23 - 24.

136. Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов». Офиц. текст – официальный интернет-портал правовой информации <http://www.pravo.gov.ru>, 06.07.2020.

137. Распоряжение Правительства РФ от 01.03.2006 № 278-р «О создании российской системы оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой, принятым в г. Монреале 16 сентября 1987 г.» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/>.

138. Распоряжение Правительства РФ от 01.08.2016 № 1634-р «Об утверждении схемы территориального планирования Российской Федерации в области энергетики»: офиц. текст. – «Собрание законодательства РФ», 15.08.2016, № 33, ст. 5207.

139. Распоряжение Правительства РФ от 08.07.2015 № 1316-р «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды»: офиц. текст. – «Собрание законодательства РФ», 20.07.2015, № 29 (часть II), ст. 4524.

140. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2017 № 1209-р «О Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2035 года»: офиц. текст. – «Собрание законодательства РФ», 26.06.2017, № 26 (Часть II), ст. 3859.

141. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года»: офиц. текст. – «Собрание законодательства РФ», 15.06.2020, № 24, ст. 3847.

142. Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 № 1912-р «Об утверждении целей и основных направлений устойчивого (в том числе зеленого) развития Российской Федерации»: офиц. текст – «Собрание законодательства РФ», 26.07.2021, № 30, ст. 5814.

143. Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р «Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года»: офиц. текст – Собрание законодательства РФ, 08.11.2021, № 45, ст. 7556.

144. Распоряжение Правительства РФ от 31.08.2002 №1225-р «Об Экологической доктрине Российской Федерации»: офиц. текст. – «Российская газета», № 176, 18.09.2002.

145. Распоряжение Президента РФ от 17.12.2009 № 861-рп «О Климатической доктрине Российской Федерации»: офиц. текст. – «Собрание законодательства РФ», 21.12.2009, № 51, ст. 6305.

146. Ревуцкая, И.Л. Загрязнение атмосферного воздуха в санитарно-защитной зоне Биробиджанской ТЭЦ / И.Л. Ревуцкая // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 1. – С. 33-41.

147. Российский статистический ежегодник. 2022: Стат. сб. / Росстат. – Р76 М., 2022. – 691 с.

148. Рыжий, И.А. Новый этап в борьбе с выбросами оксидов азота на угольных ТЭС / И.А. Рыжий // Энергохозяйство за рубежом. – 2015. – № 5(282). – С. 16-18.

149. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622012 Российская Федерация. Антропогенные выбросы парниковых газов в секторе "Землепользование, изменения землепользования и лесное хозяйство" в РФ в 2020 г: № 2022621852: заявл. 27.07.2022: опублик. 11.08.2022 / А.А. Романовская, В.Н. Коротков, А.А. Трунов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля".

150. Сергеева, И.В. Эколого-гигиенический анализ атмосферного воздуха Саратовского региона / И.В. Сергеева, Е.С. Сергеева // Качественное экологическое образование и инновационная деятельность - основа прогресса и устойчивого развития: Сборник статей VI международной научно-практической конференции, Саратов, 28–30 марта 2023 года. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2023. – С. 151-155.

151. Содержание и распределение органического и неорганического углерода в городских почвах ростовской агломерации / С.С. Тагивердиев, П.Н. Скрипников, О.С. Безуглова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2020. – № 4(208). – С. 118-129.

152. Соотношение углерода и азота в дерново-подзолистых почвах Волжско-Камского заповедника / В.И. Кулагина, Л.М. Сунгатуллина, Т.Г. Кольцова [и др.] // Региональные проблемы устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях цифровой трансформации: Сборник

статей Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 25–26 апреля 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 385-387.

153. Сравнительный анализ методов расчета углеродного следа / В.А. Тютина, А.А. Янькова, О.В. Нестерова, В.А. Семаль // Инновации молодых - развитию сельского хозяйства: Материалы 57 Всероссийской научной студенческой конференции. В 3-х частях, Уссурийск, 15–26 марта 2021 года / Отв. редактор И.Н. Ким. Том Часть III. – Уссурийск: Приморская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. – С. 246-250.

154. Сычев, В.Г. Изменение климата и углеродная нейтральность: современные вызовы перед аграрной наукой / В.Г. Сычев, А.Н. Налиухин // Плодородие. – 2021. – № 5(122). – С. 3-7.

155. Сычев, В.Г. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами / В.Г. Сычев, А.Н. Налиухин // Плодородие. – 2021. – № 6(123). – С. 38-41.

156. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии: нормативно-справочные материалы / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко, С. Нильссон, Ю.И. Булуй; М-во природных ресурсов Российской Федерации, Федеральное агентство лесного хоз-ва, Международный ин-т прикладного системного анализа. – Москва: б/и, 2006. – 803 с.

157. Тимофеева, С.С. Сокращение вредных выбросов ТЭС путем утилизации углекислого газа / С.С. Тимофеева, Г.Р. Мингалеева // Экология и промышленность. – 2011. – № 4(29). – С. 55-59.

158. Тимурзиев, А.И. Углеродный след в глобальном изменении климата и переход к «зелёной» энергетике: причины и следствия / А.И. Тимурзиев // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: Коллективная монография по материалам XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа (ГЕОКАВКАЗ 2021)". Том XI. – Москва: Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 2021. – С. 474-492.

159. Тихонова, М.В. Экологическая оценка потоков углекислого газа в условиях лесных экосистем / М.В. Тихонова, И.И. Васенев // Доклады ТСХА: Сборник статей, Москва, 05–07 декабря 2017 года. Том Выпуск 290, Часть IV. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2018. – С. 407-409.

160. Указ Президента РФ от 04.11.2020 № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов»: офиц. текст – «Собрание законодательства РФ», 09.11.2020, № 45, ст. 7095.

161. Указ Президента РФ от 08.11.2021 № 633 «Об утверждении Основ государственной политики в сфере стратегического планирования в Российской

Федерации: офиц. текст – «Собрание законодательства РФ», 15.11.2021, № 46, ст. 7676».

162. Указ Президента РФ от 19.04.2017 № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года»: офиц. текст. – «Собрание законодательства РФ», 24.04.2017, № 17, ст. 2546.

163. Урусевская, И.С. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте / И.С. Урусевская, И.О. Алябина, С.А. Шоба; Отв. ред. И.С. Урусевская. – Москва: ООО "МАКС Пресс", 2020. – 100 с.

164. Уткин, А.И. Пулы углерода фитомассы, биологического углерода и азота почв в лесном фонде России / А.И. Уткин, Д. Г. Замолотчиков, О.В. Честных // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2006. – № 2. – С. 18-34.

165. Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»: офиц. текст – «Российская газета», № 147 - 148, 07.07.2021.

166. Федеральный закон от 03.06.2011 № 107-ФЗ «Об исчислении времени»: офиц. текст. – «Российская газета», № 120, 06.06.2011.

167. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»: офиц. текст. – «Собрание законодательства РФ», 14.01.2002, № 2, ст. 133.

168. Федеральный закон от 28.06.2014 № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации»: офиц. текст. – «Российская газета», № 146, 03.07.2014.

169. Физические основы теории климата и его моделирования: труды Международной научной конференции, организованной ВМО и МСНС при поддержке Программы ООН по окружающей среде (Стокгольм, 29 июля - 10 августа. 1974 г.) / Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. – 272 с.

170. Филиппова, А.В. Анализ состояния атмосферного воздуха в Оренбуржье и пути улучшения / А.В. Филиппова, Л.Р. Кульчурина // Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности: материалы II Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14 марта 2019 года / Петровская академия наук и искусств. Том 2. – Санкт-Петербург: Петровская академия наук и искусств, 2019. – С. 100-104.

171. Фирсова, В.П. Круговорот азота в еловых биоценозах Среднего Урала / В.П. Фирсова, Т.С. Павлова, Е.В. Прокопович // Проблемы лесоведения и лесной экологии, Минск, 20–23 сентября 1990 года. Том 1. – Минск: Белорусский НИИ научно-технической информации, 1990. – С. 293-295.

172. Фокин, А.Д. Почва, биосфера и жизнь на Земле / А.Д. Фокин; Отв. ред. И.С. Кауричев; АН СССР. - М.: Наука, 1986. – 175 с.

173. Фридланд В.М. Почвенная карта РСФСР / под ред. В.М. Фридланда. Масштаб 1:2500000 – М.: ГУГК, 1988.

174. Цели ООН в области устойчивого развития [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>.

175. Цельникер, Ю.Л. Соотношение нетто- и гросс-продукции и газообмен CO₂ в высокопродуктивных сосняках и березняках / Ю.Л. Цельникер, А.Г. Молчанов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2005. – Т. 20. – С. 174-190.
176. Чепель, С.В. Подходы к оценке углеродного следа отраслей и секторов экономики Узбекистана с использованием метода "затраты - выпуск" / С.В. Чепель // Журнал экономической теории. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 254-264.
177. Черенцова, А.А. Влияние полигонов захоронения золошлаковых отходов теплоэлектростанций на окружающую среду (на примере золоотвала Хабаровской ТЭЦ-3) / А.А. Черенцова, Л.П. Майорова // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2015. – № 3(38). – С. 49-58.
178. Черенцова, А.А. Геохимические аспекты состояния почв в районах полигонов захоронения золошлаковых отходов теплоэлектростанций / А.А. Черенцова, Л.П. Майорова // Ученые заметки ТОГУ. – 2014. – Т. 5. – № 1. – С. 62-68.
179. Шерстюков, Б.Г. Глобальное потепление и его возможные причины / Б.Г. Шерстюков // Гидрометеорология и экология. – 2023. – № 70. – С. 7-37.
180. Шерстюков, Б.Г. Изменения, изменчивость и колебания климата / Б.Г. Шерстюков; Б.Г. Шерстюков. – Обнинск: ФГБУ "ВНИИГМИ-МЦД", 2011. – 293 с.
181. Экологические функции и экосистемные сервисы городских и техногенных почв: от теории к практическому применению (обзор) / В.И. Васенев, А.П.В. Ауденховен, О.Н. Ромзайкина, Р.А. Гаджиагаева // Почвоведение. – 2018. – № 10. – С. 1177-1191.
182. Экологический атлас России / А.Х. Аджиев, С.А. Барталев, М.Ю. Беккиев [и др.]. – Москва: Феория, 2017. – 510 с.
183. Электробаланс России за 2005 – 2022 годы [Электронный ресурс] - режим доступа: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial.
184. Эмиссия парниковых газов в секторе «Энергетика» / О.В. Тайлаков, Д.Н. Застрелов, Е.В. Лукина, Е.С. Снетова // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2021. – № 7. – С. 302-305.
185. Ядутов, В.В. Воздействие ТЭС на окружающую среду / В.В. Ядутов, Т.И. Петров, Ю.Н. Зацаринная // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 19. – С. 78-79.
186. Baldasso, M., Birigazzi L., Trotta, C. & Henry, M. 2012. Tutorial for tree allometric equation database development. P. 27.
187. BP Statistical Review of World Energy 2023. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
188. Chien, Shih-Chieh & Krumins, Jennifer. (2023). Anthropogenic effects on global soil nitrogen pools. The Science of the total environment. 902. 166238. 10.1016/j.scitotenv.2023.166238.
189. Coddington, Odele & Lean, Judith & Pilewskie, Peter & Snow, Martin & Richard, Erik & Kopp, G. & Lindholm, C. & Deland, Matthew & Marchenko, S. &

Haberreiter, M. & Baranyi, T. (2019). Solar Irradiance Variability: Comparisons of Models and Measurements. *Earth and Space Science*. 6. 10.1029/2019EA000693.

190. Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). World Climate Research Programme (WCRP) [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://wcrp-cmip.org/cmip-phase-6-cmip6/>.

191. Grant, Don & Zelinka, David & Mitova, Stefania. (2021). Reducing CO2 emissions by targeting the world's hyper-polluting power plants. *Environmental Research Letters*. 16. 10.1088/1748-9326/ac13f1.

192. Gustafson, Thane. *Klimat: Russia in the age of climate change / Thane Gustafson*. - Electronic text data. - Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2021. - 312 p. - Загл. с титул. экрана. - Description based upon print version of record. - Includes bibliographical references and index. - ISBN 0674269861. - ISBN 9780674269866: Б. ц. - Текст: электронный. Перевод заглавия: Климат: Россия в эпоху изменения климата Примечания о происхождении: Коллекция цифровых книг в дар от ПАО "ГМК Норильский никель". НБ СФУ.

193. Henry M, Bombelli A, Trotta C, Alessandrini A, Birigazzi L, Sola G, Vieilledent G, Santenoise P, Longuetaud F, Valentini R, Picard N, Saint-Andre L, 2013. GlobAllomeTree: international platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. *iForest* 6: 326-330 [online 2013-07-18] URL: <http://www.sisef.it/iforest/contents/?id=ifor0901-006>.

194. Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijioka, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, 2018: Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 175-312, doi:10.1017/9781009157940.005.

195. International Energy Outlook 2021 / U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, 2021. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo>.

196. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

197. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

198. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

199. IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lössche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

200. IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

201. Jenkinson, D.S., Adams, D.E. and Wild, A. Global warming and soil organic matter // *Nature* 351, 1991. pp. 304-306.

202. Li, Yifei & Zhang, Zongyue & Wang, Qingrui & Long, Xiangtao & Cao, Yuwei & Yang, Haiping & Yang, Qing. (2023). The nitrogen and carbon footprints of ammonia synthesis in China based on life cycle assessment. *Journal of environmental management*. 345. 118848. 10.1016/j.jenvman.2023.118848.

203. Mart-Jan Schelhaas, Geerten M Hengeveld, Nanny Heidema, Esther Thürig, Brigitte Rohner, Giorgio Vacchiano, Jordi Vayreda, John Redmond, Jarosław Socha, Jonas Fridman, Stein Tomter, Heino Polley, Susana Barreiro and Gert-Jan Nabuurs*. Species-specific, pan-European diameter increment models based on data of 2.3 million trees. Schelhaas et al. *Forest Ecosystems* (2018) 5:21. URL: <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0133-3>.

204. Mndela, Mthunzi & Tjelele, Julius & Madakadze, I. & Mangwane, Mziwanda & Samuels, Mogamat & Pule, Hosia & Müller, Francoois. (2022). A global meta-analysis of woody plant responses to elevated CO₂: implications on biomass, growth, leaf N content, photosynthesis and water relations. *Ecological Processes*. 11. 21. 10.1186/s13717-022-00397-7.

205. Modeling the environmental situation in a smart city / G.E. Artamonov, V.V. Erofeeva, S.L. Yablochnikov, V.A. Gutnikov // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 - Proceedings, Vienna, 20–22 октября 2020 года. – Vienna, 2020. – P. 9261566. – DOI 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261566.

206. Morel J.L., Chenu C., Lorenz K. (2015) Ecosystem services provided by soils in urban, industrial, traffic, mining and military areas (SUITMAs). *J. Soil Sedim.* 15: 1659-1666. doi:10.1007/s11368-014-0926-0.

207. Pelletier, Nathan & Leip, Adrian. (2013). Quantifying anthropogenic mobilization, flows (in product systems) and emissions of fixed nitrogen in process-based

environmental life cycle assessment: Rationale, methods and application to a life cycle inventory. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 19. 10.1007/s11367-013-0622-0.

208. Picard N., Saint-Andre L., Henry M. 2012. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, and Centre de Cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le Developpement, Montpellier, 215 pp.

209. Report of the Secretary-General on the 2019 Climate Action Summit and the Way Forward in 2020. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/cas_report_11_dec_0.pdf.

210. Tong, Dan & Zhang, Qiang & Davis, Steven & Liu, Fei & Zheng, Bo & Geng, Guannan & Xue, Tao & Li, Meng & Hong, Chaopeng & Lu, Zifeng & Streets, David & Guan, Dabo & He, Hao. (2018). Targeted emission reductions from global super-polluting power plant units. *Nature Sustainability*. 1. 10.1038/s41893-017-0003-y.

211. United Nations Environment Programme (2022). Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate crisis calls for rapid transformation of societies. Nairobi. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>

212. Vasenev I.I., I.I. Agroecological issues of soil carbon pools and GHG fluxes analysis in frame of regional ecological monitoring system rusfluxnet / I.I. Vasenev, V.I. Vasenev, R. Valentini // *Агроекология*. – 2014. – № 1. – p. 8-12.

213. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities (UN-Habitat). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.unhabitat.ru/publications/doklad-o-sostoyanii-gorodov-mira-za-2022-god>.

214. World Energy Outlook 2022. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.

215. Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R. & Mencuccini, M. 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs* 4. 63 p.

216. Zuliani, Filippo & Manzardo, Alessandro & Marson, Alessandro & Fedele, Andrea. (2023). A life cycle assessment approach for nitrogen footprint quantification: The reactive nitrogen indicator. *Science of The Total Environment*. 882. 163578. 10.1016/j.scitotenv.2023.163578.