



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ЭФА

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

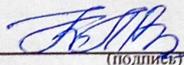
На тему: «Воздействие энергетической отрасли на окружающую среду»

Исполнитель Селезнев Данила Витальевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Симакина Татьяна Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« 05 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
1.АНАЛИЗ ВИДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ.....	4
1.1 Тепловые электростанции.....	4
1.2 Атомные электростанции.....	8
1.3 Гидроэлектростанции.....	10
2. АНАЛИТИКА ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ.....	14
2.1 Выбросы в атмосферу.....	14
2.1.1 Углекислый газ (CO ₂).....	14
2.1.2 Оксиды азота (NO _x).....	16
2.1.3 Оксид серы (SO ₂).....	18
2.1.4 Твёрдые частицы (PM ₁₀).....	20
2.2 Сбросы в гидросферу.....	22
2.2.1 Сброс нефтепродуктов.....	23
2.2.2 Сброс взвешенных веществ.....	25
2.2.3 Сброс тяжёлых металлов.....	27
2.3 Выбросы в литосферу.....	29
2.3.1 Выбросы золы-шлака.....	30
2.3.2 Выбросы нефтезагрязнённых отходов.....	32
2.3.3 Выбросы тяжёлых металлов.....	34
3. ПУТИ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ.....	37
3.1 Топливо-технологические решения.....	37
3.2 Очистка дымовых газов.....	37
3.3 Водоподготовка и замкнутые циклы.....	38
3.4 Работа с золой, шламами и почвой.....	38
3.5 Углеродные инновации.....	39
3.6 Сводный результат.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	40
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	44

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее важной отраслью промышленности Российской Федерации является топливно-энергетический комплекс (ТЭК). Стабильное функционирование и прогресс данного комплекса, являются гарантом роста экономики государства и развития социальной сферы внутри общества.

Энергетический комплекс России отличается тем, что в стране представлены все существующие на сегодняшний день виды генерации электроэнергии: ТЭЦ – станции основывающиеся на принципе сжигания топлива, АЭС задействующие энергию деления ядер, ГЭС, использующие кинетическую энергию потока воды, а также Ветровые и Солнечные электростанции, работающие по принципу возобновляемых источники энергии.

Основным типом энергии в стране является тепловая энергия, генерируемая в процессе сжигания различных видов топлива, таких как: природный газ, уголь, нефть и производные из неё нефтепродукты.

Из выше сказанного можно сделать неутешительный вывод, что наибольший негативный вклад в изменение экологической обстановки России вносят ТЭЦ, загрязняющие атмосферу и почвы по средствам теплового и химического воздействия.

Основываясь на имеющейся в общем доступе статистике, можно сделать вывод о неумолимом росте энергетической отрасли с каждым годом, что непосредственно приводит к воздействию на окружающие нас сферы природы: атмосферу, гидросферу, литосферу и конечно же биосферу.

Актуальность темы определяется тем, что темпы роста энергетической отрасли будут лишь повышаться, что будет непрерывно воздействовать на окружающую нас среду.

Цель дипломной работы – оценить воздействие энергетической отрасли Российской Федерации на окружающую среду.

Для выполнения поставленной цели необходимо выполнить следующие

задачи:

- Рассмотреть энергетическую отрасль России
- Провести анализ типов используемых электростанций;
- Выявить воздействие предприятий электроэнергетики Российской Федерации на окружающую среду.

1.АНАЛИЗ ВИДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Производство электроэнергии возможно за счёт использования различных природных ресурсов, включая возобновляемые и невозобновляемые источники энергии.

При рассмотрении данных о выработке электроэнергии по типам электростанций на государственном уровне, фундаментальную основу представляют ТЭС (62,7%), на втором месте находятся АЭС (18,9%) и на третьем ГЭС (17,6%) – рисунок 1.

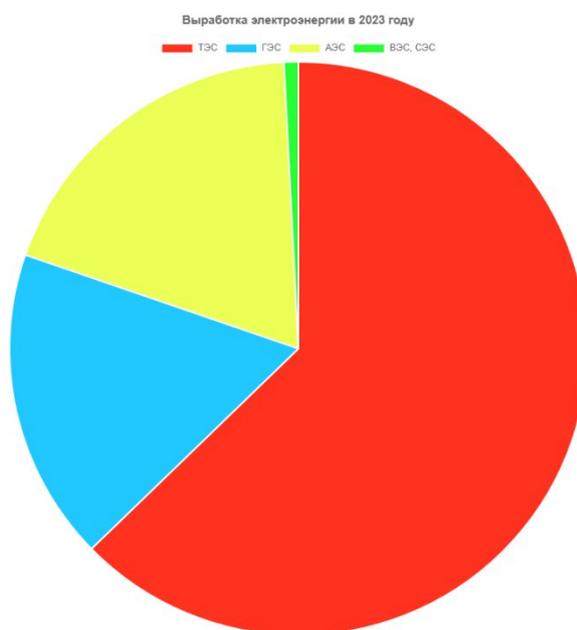


Рисунок 1. Распределение выработанной электроэнергии по типам электростанций

Рассмотрим подробнее каждый из представленных выше типов электростанций.

1.1 Тепловые электростанции

Тепловые электростанции (ТЭС) – это электростанции, на которых генерация электроэнергии происходит по принципу преобразования тепловой энергии, получаемой при сжигании топлива, в механическую,

передаваемую вращающимся валом электрогенератора.

По данным за 2023 год доля ТЭС [1] в выработке электроэнергии составила 62,7 %. По данным Росстата годовая выработка электроэнергии на ТЭС составила порядка 720 млрд кВт·ч.

На тепловых электростанциях в качестве сжигаемого топлива используются – рисунок 2:

- Природный газ;
- Уголь и прочие твёрдые виды топлива;
- Жидкие нефтепродукты, такие как мазут.

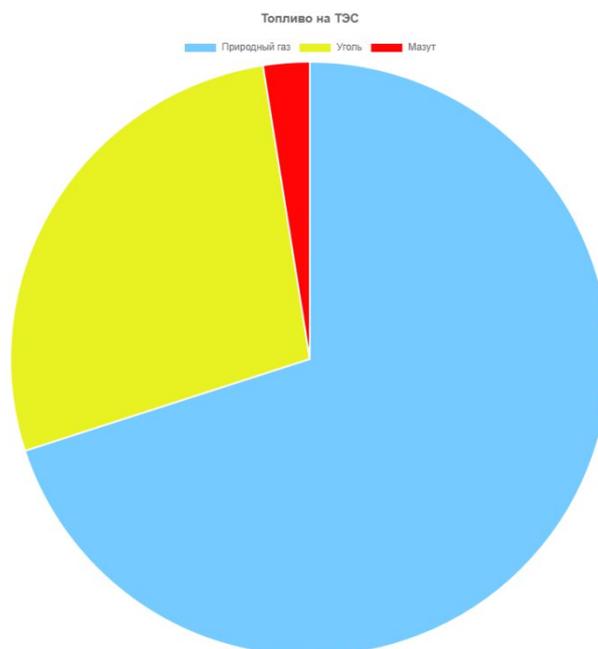


Рисунок 2. Распределение используемого топлива на ТЭС

По виду потребляемого топлива первое место занимает природный газ (70%), второе - уголь (27,5%), на третьем – мазут и прочие виды топлива (2,5%).

Карта расположения тепловых электростанций на карте России представлен на рисунке 3.

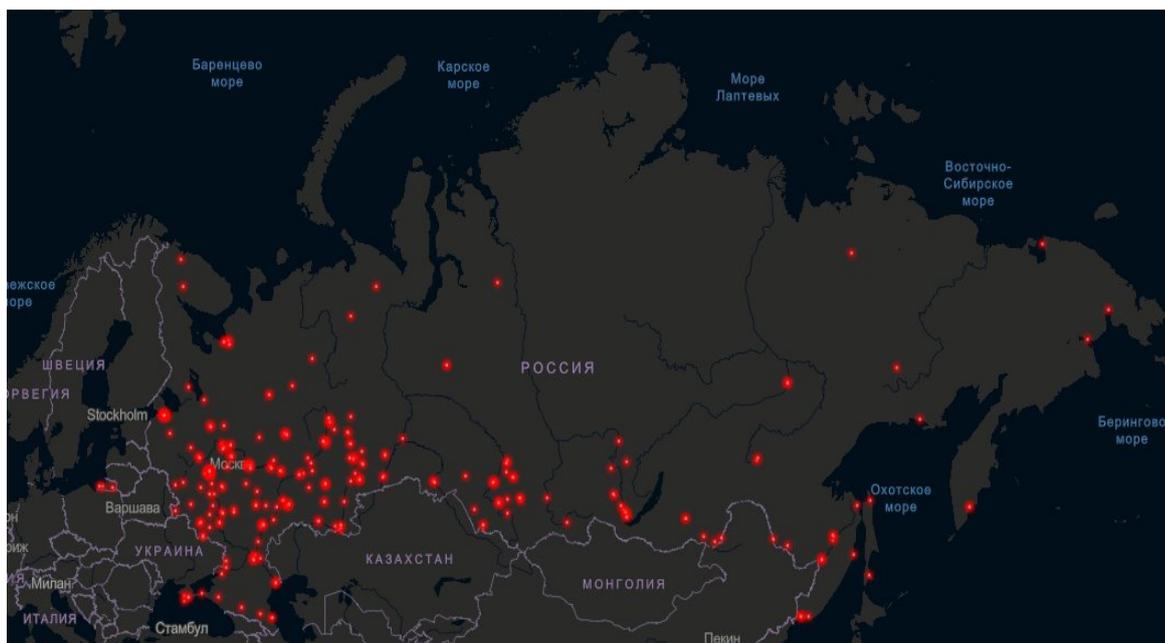


Рисунок 3. Карта размещения ТЭС по России

ТЭС подразделяются на 2 типа: теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и конденсаторные электростанции (КЭС).

В теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) отработанный турбиной пар и нагретая вода используются для коммунального водо- и теплоснабжения. Для минимизации потерь и повышения коэффициента полезного действия, ТЭЦ строятся вблизи городов, которые непосредственно являются потребителями вырабатываемого электричества и тепла. Схема работы ТЭЦ можно увидеть на рисунке 4.

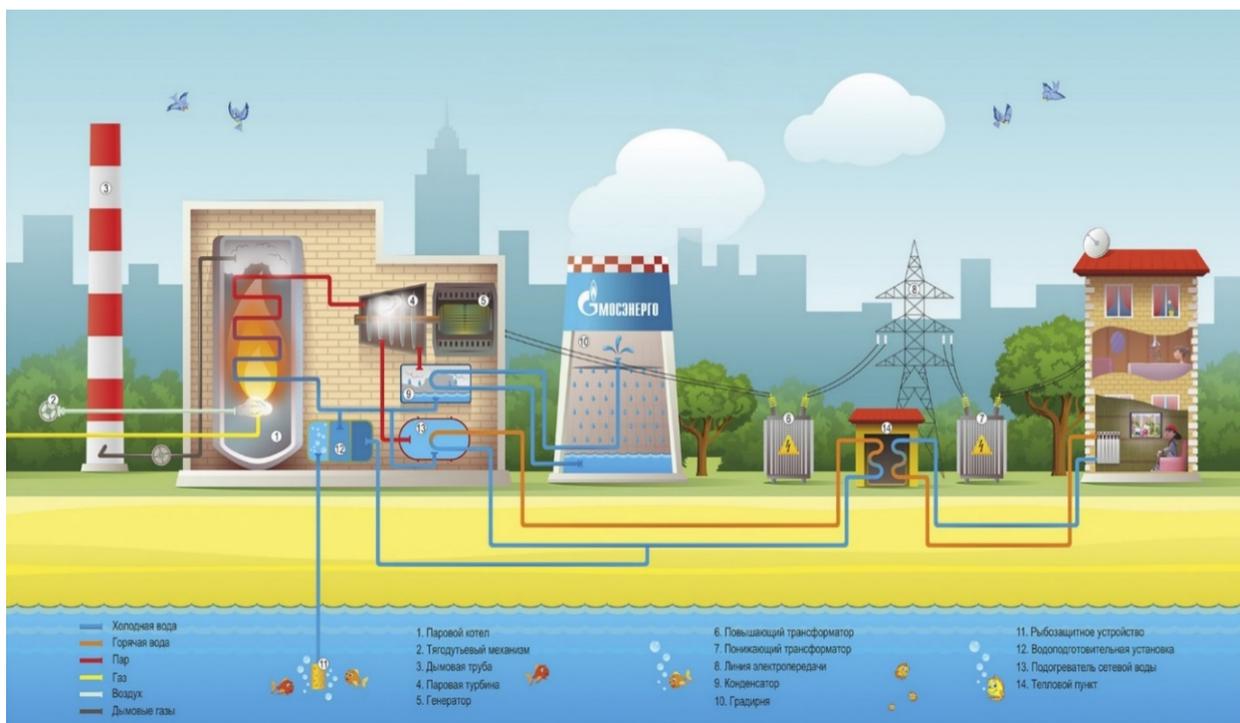


Рисунок 4. Схема работы теплоэлектростанции (ТЭЦ)

Конденсаторные электростанции (КЭС) отличаются тем, что отработанный пар, в отличие от ТЭЦ, охлаждается, проходит процесс конденсации и снова поступает в котёл.

Сравнительными преимуществами тепловых электростанций по сравнению с другими типами являются:

- Стабильность выработки электроэнергии не смотря на сезонность;
- Сравнительная простота эксплуатации и обслуживания оборудования;
- Малая требуемая площадь для сооружения и эксплуатации инфраструктурного комплекса зданий теплоэлектростанции с минимальными потерями хозяйственного оборота земли;

Так же стоит упомянуть и о недостатках данного типа электростанций:

- Зависимость от внешних поставок невозобновляемых видов топлива, что выливается в затраты на закупку и транспортировку топлива;
- Низкое КПД примерное равное 40%;
- ТЭЦ оказывают наибольшее негативное влияние на экологическую обстановку

При сжигании топлива в атмосферу происходит выброс углекислого газа (CO_2), способствующего парниковому эффекту, оксида серы (SO_2), вызывающего кислотные дожди, различных твёрдых частиц, проникающих в организм человека через дыхательные пути и вызывающих различные заболевания. Так же в случае КЭС, сброс нагретой воды в охлаждающий водоём приводит к нарушению температурного режима и разрушению экосистемы. Зола и шлаки, остающиеся после сгорания угля, могут являться опасным фактором проникновения тяжёлых металлов в почву.

1.2 Атомные электростанции

Атомная электростанция (АЭС) – это тип электростанции, на которой генерация электрической энергии происходит за счёт тепловой энергии, выделяющейся при ядерной реакции деления атомов. На момент 2025 года на территории России введены в эксплуатацию 11 АЭС [4] с общим количеством реакторных установок в 37 единиц. По данным 2023 года на реакторах АЭС суммарная выработка электроэнергии составила 217,8 млрд кВт·ч. Карта расположения атомных электростанций на территории России представлена на рисунке 5.

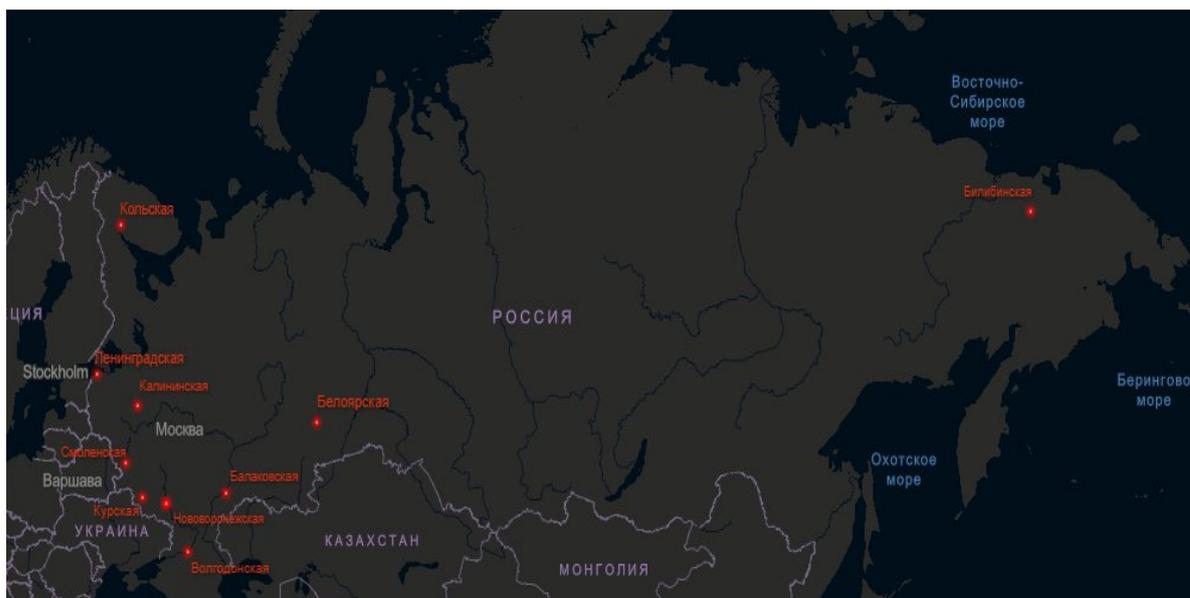


Рисунок 5. Карта размещения АЭС по России

В общих чертах, процесс производства энергии схож с аналогичным на ТЭС. Ключевым отличием является то, что теплоэнергия вырабатывается в процессе атомных реакций деления ядер. Получаемое в процессе тепло нагревает теплоноситель, которым чаще всего является вода, который в свою очередь приводит в движение турбину генератора. Стабильность данного процесса заключается в постоянном поддержании количества ядерного топлива, чтобы его величина не была меньше некоторой величины, названной «критической массой». Схема процесса изображена на рисунке 6.

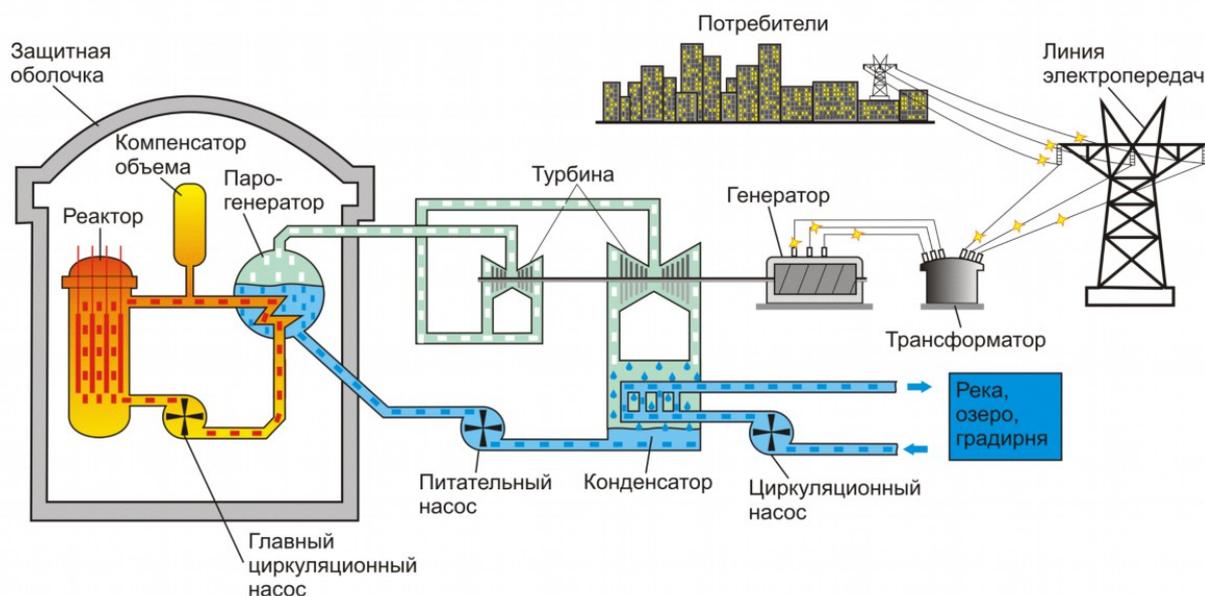


Рисунок 6. Схема работы атомного реактора.

Из преимуществ в использовании атомных реакторов можно выделить:

- Автономность и независимость от источников топлива
- Высокое КПД, обеспечивающее значительную выработку электроэнергии
- Экологическая нейтральность, выраженная в отсутствии вредных выбросов в окружающую среду (при условии исправности)

К негативным аспектам эксплуатации атомных станций можно отнести:

- Потребность в постоянном охлаждении водой из прилегающего водоёма-охладителя
- Трудности и риски при хранении, транспортировке и переработке отработанного ядерного топлива
- Тяжести последствий и риск заражения окружающей среды при техногенной аварии на электростанции

1.3 Гидроэлектростанции

Гидроэлектростанция (ГЭС) – является типом электростанций, завязанным на выработке электроэнергии за счёт потенциальной и кинетической энергии движущейся воды. Напор воды образуется за счёт

падения с высоты воздвигнутой плотины. Он раскручивает турбины электрогенератора, вырабатывающего энергию. Схему работы ГЭС можно наблюдать на рисунке 7.

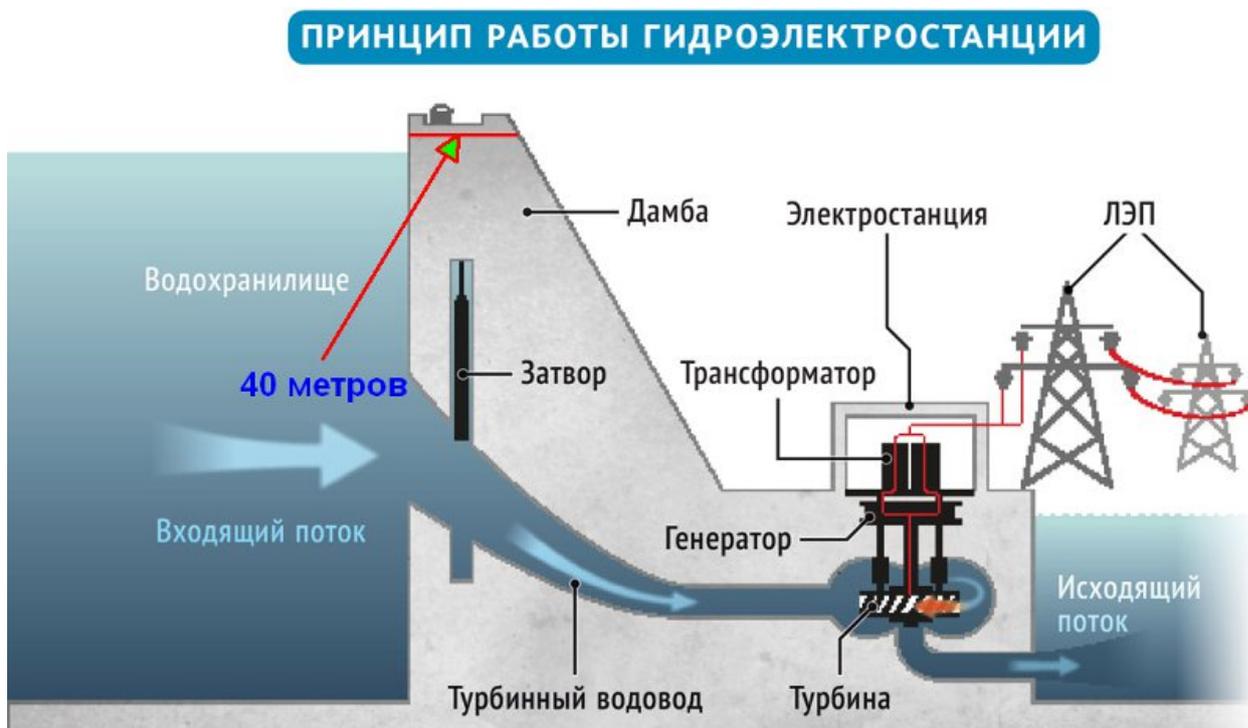


Рисунок 7. Схема работы гидроэлектростанции

На территории Российской Федерации находится 200 эксплуатируемых гидроэлектростанций самой разной мощности. Крупнейшей является Саяно-Шушенская ГЭС с годовой выработкой в 23 500 млрд кВт·ч, расположенная на реке Енисей.

По данным за 2023 год выработка гидроэлектростанций составила 202 млрд кВт·ч.

Россия обладает огромным потенциалом по выработке электроэнергии методом ГЭС, по причине наличия на территории страны порядка 2,8 млн рек, что является 22% от мирового уровня. По подсчётам, гидроэнергетический потенциал, который будет экономически оправдан составляет 850 млрд кВт·ч.

Стоит отметить, что 80% экономического потенциала приходится на водные ресурсы находящиеся в азиатской части страны и лишь 20% на европейскую.

Реальная же степень освоения этого экономического гидропотенциала составляет порядка 23%. Неравномерность расположения гидроэлектростанций можно наблюдать на рисунке 8.

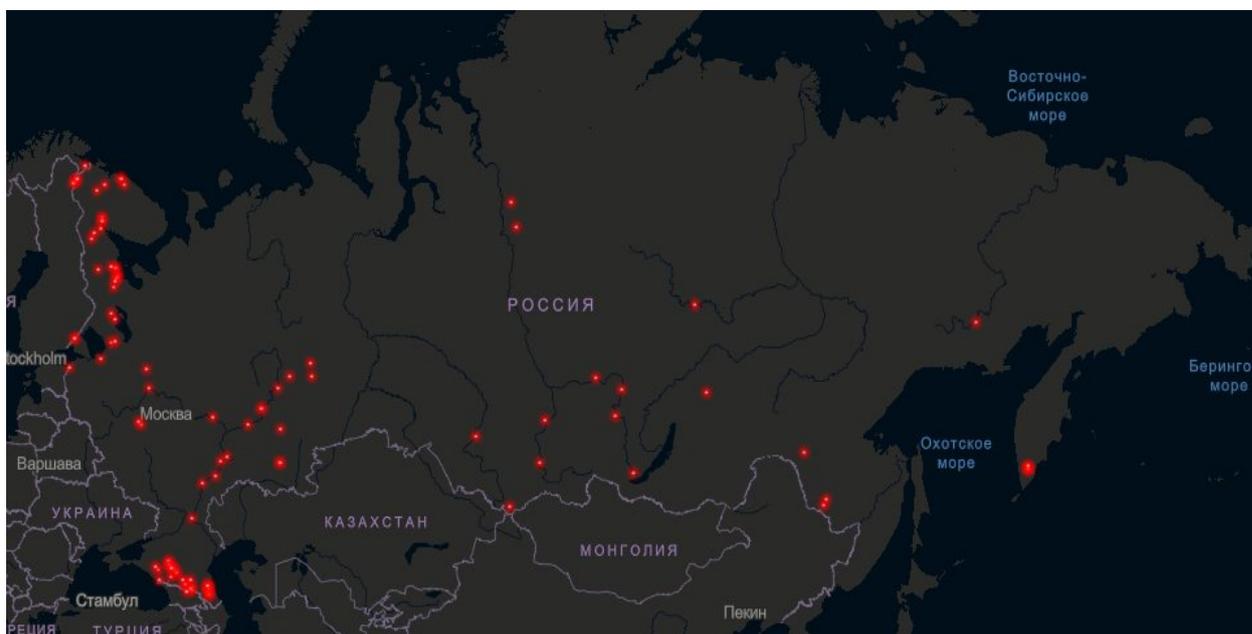


Рисунок 8. Карта размещения ГЭС по России

Преимуществами гидроэлектроэнергетики являются:

- Используя неисчерпаемую кинетическую и потенциальную силы воды, ГЭС не нуждается в сторонних видах топлива.
- Являются наиболее эффективными электростанциями с КПД = 90%
- Гибкость в работе. При необходимости снижения или увеличения выработки электричества можно регулировать работу станции
- В процессе производства электроэнергии практически отсутствуют выбросы загрязняющих веществ.

Как отрицательные факторы можно выделить:

- Нарушение естественных экосистем при строительстве плотин и водохранилищ
- Влияние на биосферу водоемов выражается в нарушении миграции рыб из-за преграждения естественных путей дамбой

- Со временем водохранилище накапливает ил и донный отложения, что приводит к росту количества цианобактерий и снижению качества воды.

2. АНАЛИТИКА ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Эксплуатация электростанций - один из главных факторов антропогенного воздействия на окружающую среду. Хотя профиль загрязнений сильно различается от каждого вида электростанций, совокупно электроэнергетика остаётся крупнейшим источником глобальных выбросов CO₂ и набором иных негативных эффектов, но именно в ней же сегодня происходит наиболее быстрая экологичная трансформация.

2.1 Выбросы в атмосферу

Тепловые электростанции выбрасывают в атмосферу четыре ключевые группы загрязнителей:

- парниковый CO₂, определяющий углеродный след и изменение климата;
- оксиды азота (NO_x), формирующие приземной озон и кислотные дожди;
- диоксид серы (SO₂), ответственный за закисление среды и коррозию;
- мелкие твёрдые частицы (PM₁₀), которые глубоко проникают в лёгкие и повышают риск сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний.

2.1.1 Углекислый газ (CO₂)

Первичный продукт сгорания любого углеродсодержащего топлива на ТЭЦ — CO₂. Его количество почти линейно зависит от теплотворной способности и массы сожжённого топлива. На газовых ТЭЦ удельная эмиссия составляет 350-420 г CO₂/кВт·ч, на пылеугольных — 850-1050 г, современные биотопливные котлы могут опускаться ниже 300 г. Хотя CO₂ не токсичен при обычных концентрациях, он определяет климатическую повестку: именно ТЭЦ дают ≈ 40% суммарных выбросов парниковых газов в энергетике РФ.

Таблица 1. Статистика эмиссии CO₂ за прошедшее десятилетие

Год	СО ₂ , МЛН Т
2014	600
2015	585
2016	580
2017	600
2018	615
2019	620
2020	570
2021	605
2022	595
2023	590

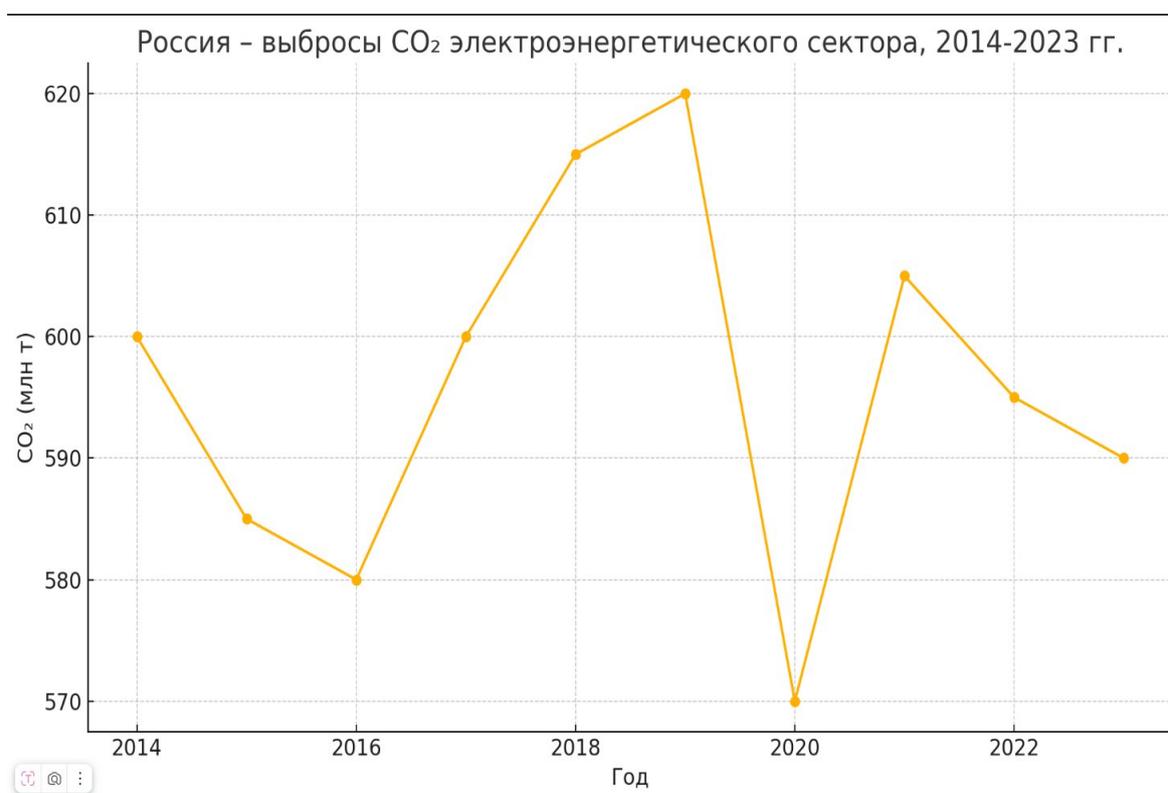


График 1. Динамика выбросов СО₂

Начиная с 2014 года заметен двухлетний спад в количестве выбросов с 600 до 580 млн т, что обусловлено экономическим кризисом и падением курса рубля, следствием которых стал спад производства и спрос на электроэнергию.

Второй обвал зафиксирован в 2020 году и обусловлен началом глобальной пандемии COVID-19. В силу вводимых ограничений, была снижена эксплуатация предприятий в различных отраслях промышленности, что снизило показатели выбросов CO₂ в атмосферу до 670 млн т в год.

За последние годы наблюдается снижение количества выбросов в атмосферу не только CO₂, но и других вредных веществ, что является следствием начала модернизации старых ТЭС с их переходом на топливо в виде природного газа, ввода более совершенных систем фильтрации воздуха и постройки новых станций по современным стандартам.

2.1.2 Оксиды азота (NO_x)

NO_x образуются при высокотемпературном (≥ 1350 °C) горении за счёт окисления атмосферного азота, а также «топливного» N, содержащегося в угле и мазуте. Они реагируют в атмосфере, образуя приземной озон, кислотные дожди и мелкие аэрозоли нитратов. Для человека NO₂ раздражает дыхательные пути и повышает риск астмы. Российский суточный ПДК [14] для NO₂ — 0,06 мг/м³; в санитарной зоне крупных угольных ТЭЦ реальная концентрация колеблется 0,02-0,04 мг/м³ (40-70% ПДК [14]).

Таблица 2. Статистика эмиссии NO_x за прошедшее десятилетие

Год	NO _x , тыс т
2014	1 030
2015	1 000
2016	985
2017	990
2018	995
2019	1 005
2020	940
2021	980
2022	970
2023	965

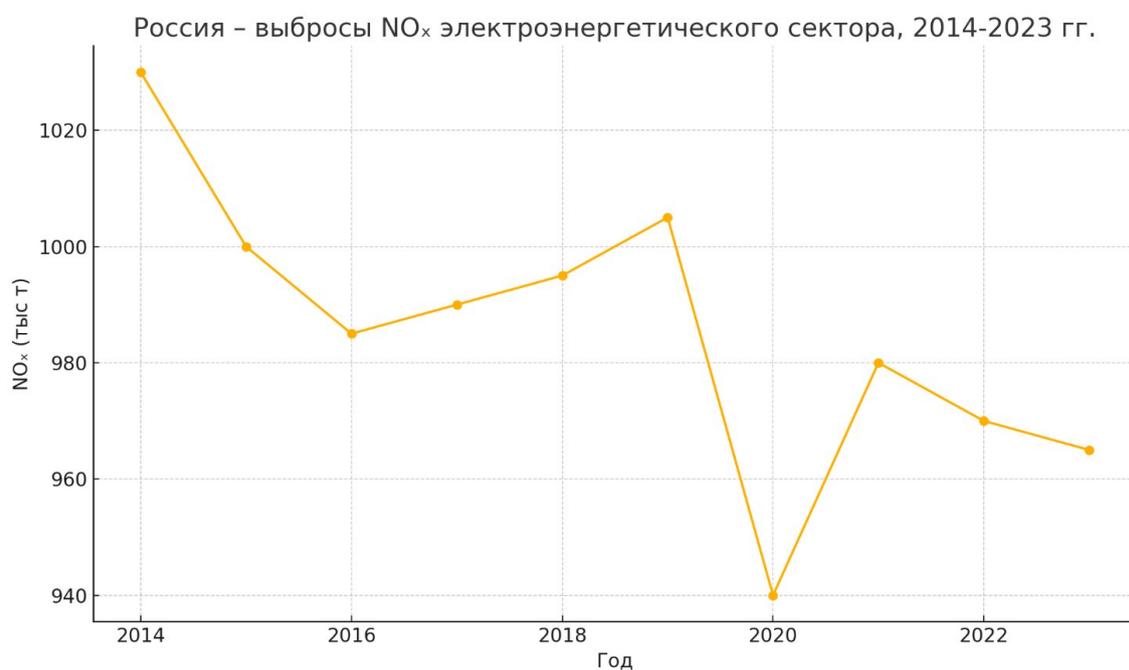


График 2. Динамика выбросов NO_x

Начиная с 2014 года выбросы диоксида азота демонстрируют умеренный нисходящий тренд: за первые два года они сократились с 1 030 до 985 тыс т. Основные предпосылки те же, что и для CO₂: рецессия 2015-2016 гг. на фоне санкций и обвала курса рубля привела к падению промышленного производства и уменьшению спроса на электроэнергию. Дополнительно сыграли первые этапы модернизаций – установка низко-NO_x-горелок и

перевод части мазутных котлов на природный газ, что снизило температуру факела и образование «термических» оксидов азота.

В 2020 году фиксируется резкий провал до 940 тыс т, совпавший с началом пандемии COVID-19: локдауны сокращали загрузку предприятий, а необычно тёплая зима снизила потребности в тепле. Уже к 2021-му спрос частично восстановился, и показатель подрос до 80 тыс т, однако последующие два года вновь идут вниз (965 тыс т в 2023 г.). На этот раз снижение обусловлено технологическими факторами: массовым внедрением селективного некаталитического восстановления на газовых пар-газовых установках, запуском первых селективных каталитических систем на крупных угольных блоках Сибири и Урала, а также продолжающимся постепенным выводом старых пылеугольных котлов.

2.1.3 Оксид серы (SO₂)

SO₂ генерируется при сжигании сернистого угля и мазута: сера полностью окисляется в газовой фазе. Разовая санитарная ПДК [14] SO₂ в РФ — 0,5 мг/м³, суточная — 0,05 мг/м³; превышения фиксируются, прежде всего, в Кузбассе и Норильске. Экологические эффекты: кислотные осадки (щитовые породы Урала уже демонстрируют деградацию), коррозия сооружений, раздражение дыхательной системы. Снижение возможно несколькими путями: переход на газ или низкосернистый уголь (<0,3 % S), мокрые установки десульфуризации с гидроксидом кальция (Ca(OH)₂), что приводит к 95 % эффективности, но они требуют значительного количества воды и дают побочный продукт в виде шламового гипса (CaSO₄·2H₂O).

Таблица 3. Статистика эмиссии SO₂ за прошедшее десятилетие

Год	SO ₂ , тыс т
2014	950
2015	920
2016	890
2017	850
2018	830
2019	810
2020	760
2021	780
2022	770
2023	760

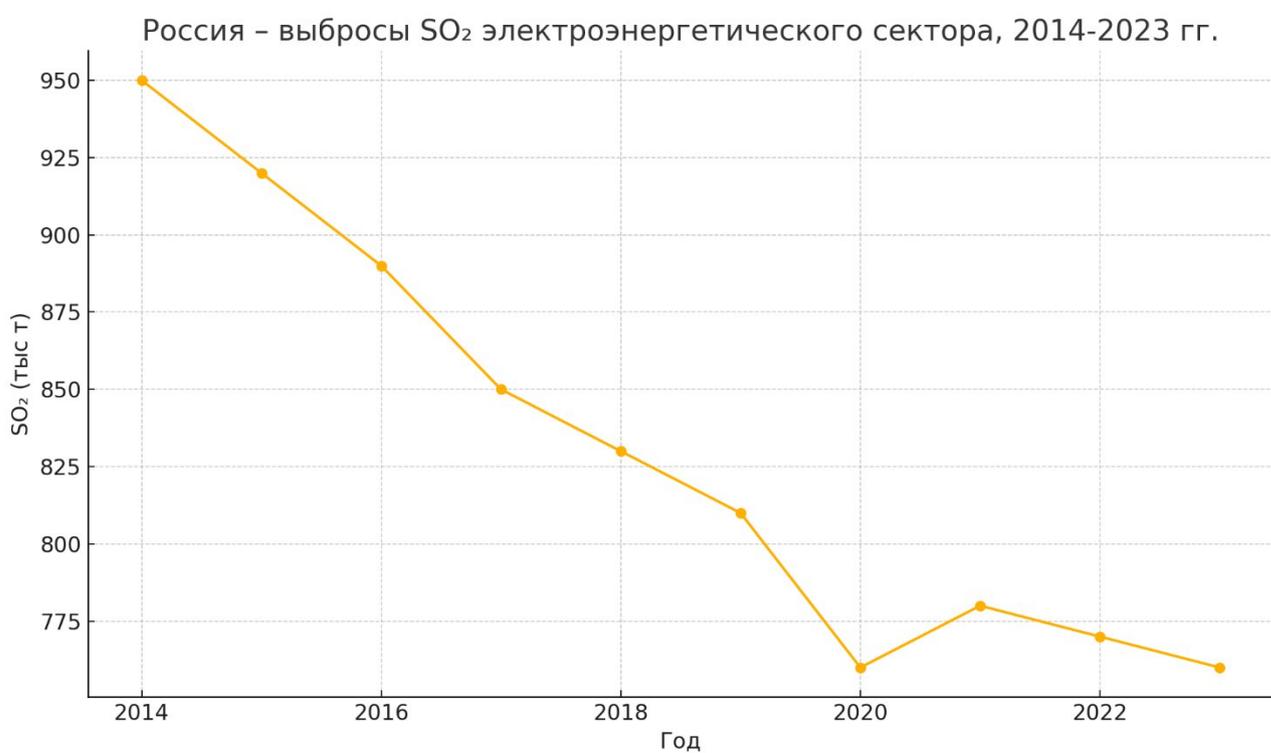


График 3. Динамика выбросов SO₂

Начиная с 2014 года прослеживается устойчивое снижение выбросов SO₂ от российских ТЭС: за первые два года они сократились с ≈950 до ≈890 тыс т. Этот спад совпал с экономическим кризисом 2015-2016 гг., падением промышленного производства и переходом нескольких крупных станций с высокосернистого мазута на более чистое топливо (низкосернистый уголь и

природный газ). Одновременно стартовали первые проекты мокрых установок десульфуризации на Рязанской и Сургутской ГРЭС, дав локальное снижение сернистых выбросов на 40-60 %.

С 2017 по 2019 гг. тренд продолжился: вывод старых мазутных котлов и расширение программы низкосернистого угля опустили показатель до 810 тыс т. Самым низким значением стал 2020 год — 760 тыс т: пандемия COVID-19 снизила загрузку угольных блоков, а необычно тёплая зима сократила тепловую нагрузку на ТЭЦ.

В 2021-м спрос на электроэнергию отыгрался, и часть угольной генерации вернулась — выбросы подросли до 780 тыс т. Однако дальнейшая модернизация снова повернула кривую вниз: к 2023 году уровень стабилизировался около 760 тыс т. Таким образом, за девять лет сокращение выбросов SO₂ составило порядка 20 %. При сохранении темпов модернизации и замещения угля газом сектор может выйти ниже 700 тыс т уже к концу десятилетия.

2.1.4 Твёрдые частицы (PM₁₀)

PM₁₀ (Particulate Matter ≤ 10 μm) - это взвешенные в воздухе твёрдые и жидкие частицы, диаметр которых не превышает 10 микрометров (одна сотая миллиметра). Именно такой размер считается «вдыхаемым»: частицы легко проходят через носоглотку и оседают в трахее и крупных бронхах в лёгких.

Частицы механически выносятся из топки или конденсируются из металлооксидных паров. Крупная зола оседает в золоуловителях, но мелкая фракция <10 мкм уходит в трубу и достигает лёгких человека, вызывая ХОБЛ и сердечно-сосудистые заболевания. Российские ТЭЦ после модернизаций 2010-х перешли от мокрых скрубберов к электрофильтрам и рукавным фильтрам; современные нормы требуют ≤50 мг/м³ в дымовом газе, что отвечает европейскому ВАТ-уровню. Тем не менее старые агрегаты всё

ещё выбрасывают сотни тонн PM_{10} в год, давая «чёрный снег» по розе ветров.

Таблица 4. Статистика эмиссии PM_{10} за прошедшее десятилетие

Год	PM_{10} , тыс т
2014	120
2015	118
2016	115
2017	112
2018	110
2019	108
2020	102
2021	105
2022	103
2023	100

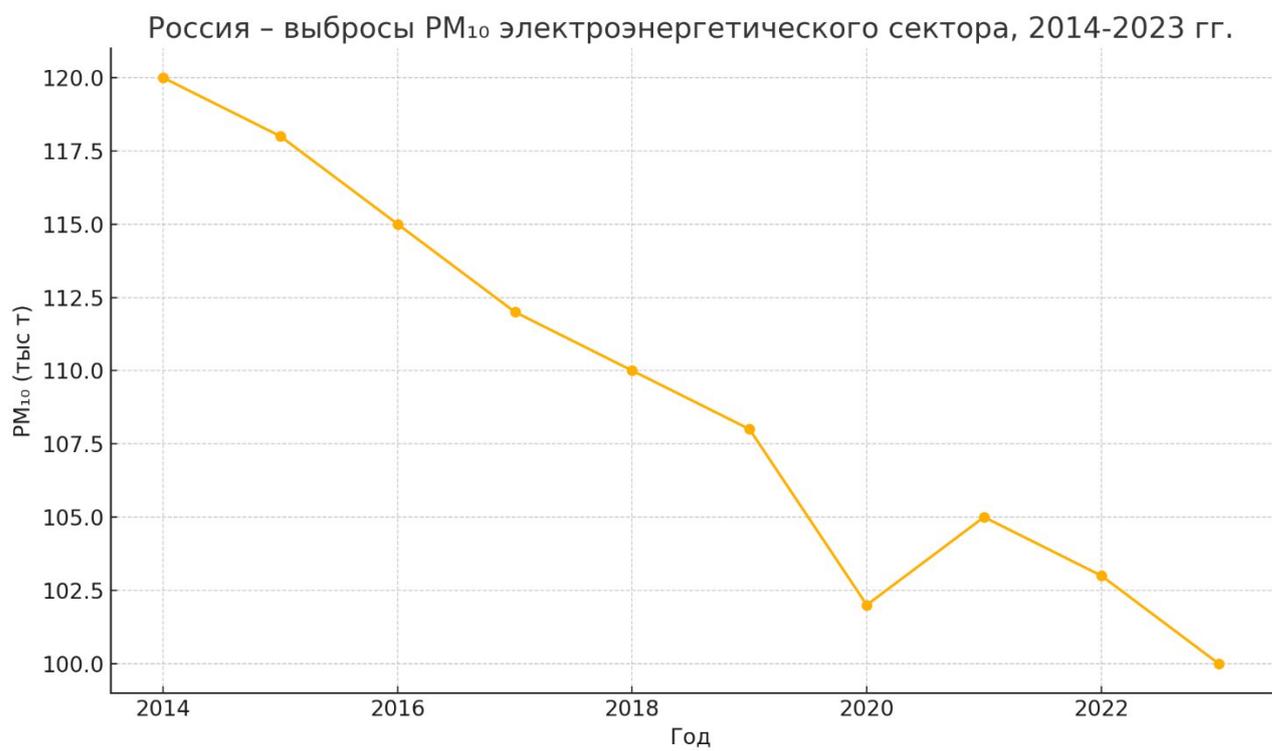


График 4. Динамика выбросов PM_{10}

Начиная с 2014 года наблюдается уверенный двухлетний спад выбросов взвешенных частиц PM_{10} : с 120 до 115 тыс т. Основная причина –

экономический кризис 2015-2016 гг. и резкое удорожание импорта из-за падения курса рубля, что привело к сокращению промышленного производства, а вместе с ним – к меньшей загрузке пылеугольных котлов. Одновременно начались первые проекты по замене устаревших мокрых скруберов на электрофильтры и рукавные фильтры, что сразу дало ощутимый эффект по пыли.

Следующий резкий минимум пришёлся на 2020 год: выбросы обрушились до 102 тыс т. Это совпало с локдаунами пандемии COVID-19 и аномально тёплой зимой, когда тепловая нагрузка ТЭЦ существенно снизилась. Уже в 2021-м, на фоне восстановления спроса на электроэнергию и частичного возврата угольной генерации, показатель отскочил до 105 тыс т, но последующие шаги модернизации – ввод электрофильтров на Братской, Назаровской и Рефтинской ГРЭС, а также перевод резервных мазутных котлов на газ – вновь развернули кривую вниз: к 2023 году уровень закрепился на отметке около 100 тыс т.

Таким образом, за девять лет выбросы РМ₁₀ сократились примерно на 17 %. Дальнейший плановый вывод старых пылеугольных блоков и обязательный переход крупных станций на фильтры класса «НДТ» (ИТС-38 [8]) позволяют прогнозировать снижение ниже 90 тыс т уже к концу десятилетия, что заметно улучшит качество воздуха в промышленных агломерациях Сибири и на Урале.

2.2 Сбросы в гидросферу

Сбросы электростанций в гидросферу условно делятся на семь ключевых групп:

- термические (горячая вода из систем охлаждения, повышающая температуру водоёма),
- взвешенные минеральные частицы (зола, шламы, песок, заиливающие дно),

- нефтепродукты и смазочные масла (плёнка нарушает газообмен и токсична для икры),
- растворённые соли тяжёлых металлов — Cu, Fe, Zn, Hg (биоаккумулируются в цепях питания),
- органические вещества с высоким ХПК/БПК (промывочные реагенты, конденсат углеводородов, вызывают кислородный дефицит),
- питательные элементы — азот и фосфор (стимулируют эвтрофикацию и «цветение» воды)

Таблица 5. Нормы ПДК [14] для воды

Группа	Происхождение на ТЭС	Экологический эффект	Норматив-ПДК
Термические	Охладители турбин, градирни	Повышение T водоёма приводит к кислородному дефициту	$\Delta T \leq 3 \text{ }^\circ\text{C}$
Нефтепродукты	Утечки турбинных масел, аварийные проливы	Плёнка на поверхности, токсичность для организмов	0,05 мг/л
Взвешенные вещества	Промывка фильтров, шламо- и золослив	Заиливание дна, перенос металлов	0,75 мг/л
Органика (ХПК/БПК)	Моющие/ингибиторные реагенты, конденсаты	Снижение O_2 , цветение воды	ХПК 30 мг O_2 /л
Тяжёлые металлы (Cu, Zn)	Коррозия теплообменников, фильтраты золоотвалов	Биоаккумуляция, токсичность	Cu 0,001/ Zn 0,01 мг/л
Питательные вещества	Сбросы ионитов, реагентов	Эвтрофикация	N 3 / P 0,05 мг/л
Радионуклиды (АЭС)	Дренажи спецводоочистки	Дозовая нагрузка	^3H — 760 Бк/л

2.2.1 Сброс нефтепродуктов

Сброс нефтепродуктов в водоём образует на поверхности тонкую плёнку, которая нарушает газообмен: вода хуже насыщается кислородом, что грозит гибелью икры и мальков; при разложении углеводородов дополнительно расходуется растворённый O_2 . Плёнка экранирует свет,

подавляя фотосинтез водорослей и фитопланктона — основу пищевой цепочки. Ароматические и полициклические соединения, входящие в состав масел и дизельного топлива, токсичны и канцерогенны: они проникают через жабры, накапливаются в тканях рыб и переходят по пищевой цепи, достигая человека. Кроме того, нефть сорбирует и переносит тяжёлые металлы и другие загрязнители, расширяя зону поражения далеко за пределы точки сброса.

Таблица 6. Статистика сбросов нефтепродуктов за прошедшее десятилетие

Год	Нефтепродукты, т
2014	6 500
2015	6 200
2016	5 900
2017	5 800
2018	5 500
2019	5 300
2020	4 600
2021	4 800
2022	4 700
2023	4 500



График 5. Динамика сбросов нефтепродуктов

За десятилетие сокращение сбросов нефтепродуктов объясняется прежде всего технологическим обновлением: с 2014 г. энергетики последовательно выводили мазутные пиковые котлы и переводили оставшиеся станции на природный газ, одновременно герметизируя маслосистемы турбин и оснащая выпуски коалесцентными фильтрами и ловушками, предписанными ИТС-10 [9]. Резкий провал 2020 г. стал исключением — локдауны и аномально тёплая зима снизили тепловую нагрузку ТЭЦ и объёмы циркуляционной воды, поэтому вместе с расходом масел упала и масса их стоков. В 2021 г. часть объёма вернулась: промышленность восстановила спрос, а резервные мазутные установки вновь потребовались в энергосистеме. Однако уже с 2022 г. кривая вновь идёт вниз: на ключевых ГРЭС ввели ещё семь герметичных турбин и перешли на синтетические масла с увеличенным межзаменным ресурсом, что окончательно укрепило тренд на снижение нефтяной компоненты в гидросферных выбросах.

2.2.2 Сброс взвешенных веществ

Сброс взвешенных веществ — зольных частиц, шлама, тонкого песка — опасен тем, что они заиливают русла и донные биотопы: частицы оседают, образуя плотный анаэробный слой, в котором разрушаются места нереста. Одновременно мутная вода рассеивает свет, ущемляя фотосинтез водорослей и фитопланктона — первичного звена пищевой цепи. Снижение прозрачности на 20-30 % уже уменьшает прирост биомассы. На поверхности частиц адсорбируются тяжёлые металлы и органические токсины, что способствует их дальнему переносу и вторичному загрязнению, а при концентрациях свыше 0,75 мг/л (ПДК [14] для рыбохозяйственных вод) взвесь травмирует жабры

рыб, ухудшая газообмен и повышая смертность молоди. Вместе это приводит к деградации водных экосистем, ускоряет заиление водоёмов.

Таблица 7. Статистика сбросов взвешенных веществ за прошедшее десятилетие

Год	Взвешенные вещества, т
2014	1 800
2015	1 750
2016	1 700
2017	1 650
2018	1 600
2019	1 550
2020	1 400
2021	1 450
2022	1 420
2023	1 400

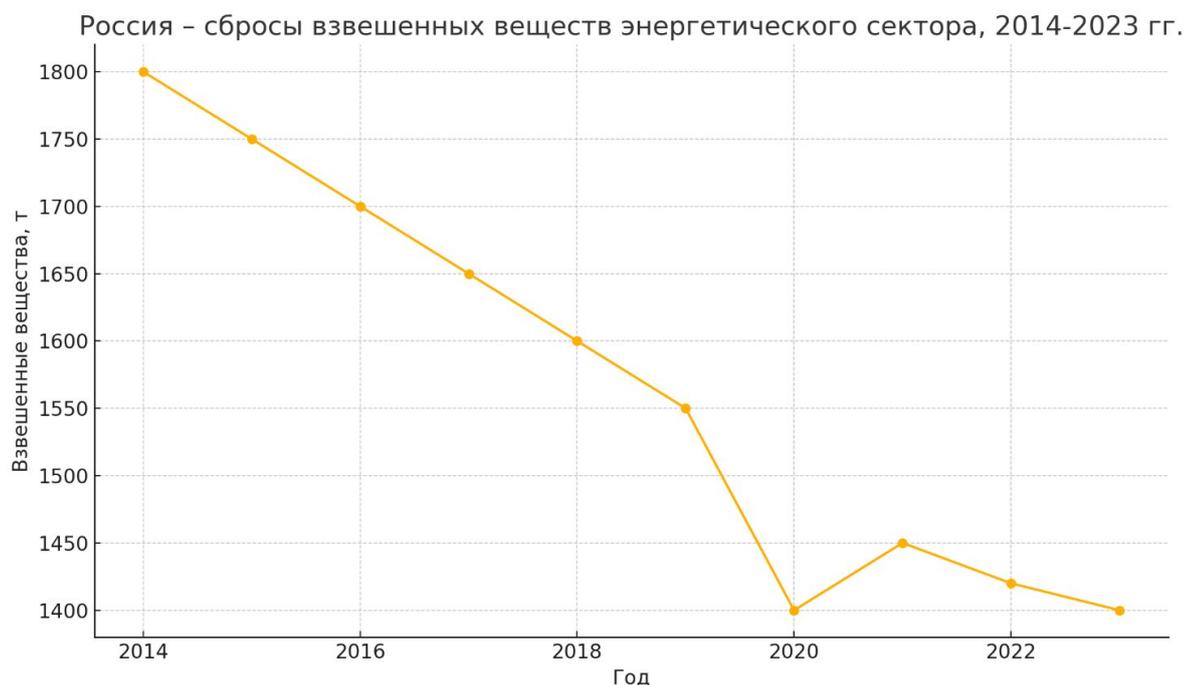


График 6. Динамика сбросов взвешенных веществ

График демонстрирует устойчивое снижение массы взвешенных веществ, сбрасываемых энерго-объектами в воду: с 1800 т в 2014 г. показатель поэтапно падает до 1550 т к 2019-му (средний темп – 3-4 % год⁻¹). Это результат закрытия открытых золоотвалов и перехода ТЭС на сухое

золошлакоудаление, установки шлам-прессов и перехода части угольных станций на газ, что резко сократило промывку фильтров и объём зольной суспензии в стоках. В 2020 г. видно резкое проседание до 1400 т: помимо завершения ряда модернизаций, сказались недогруз ТЭС и сокращение оборотной воды из-за тёплой зимы и локдаунов COVID-19. Небольшой отскок 2021 г. (до 1450 т) связан с возвращением промышленного спроса и пусконаладкой после ремонтов, однако уже в 2022-2023 гг. кривая снова идёт вниз – запущенные линии сухого золоноса и геотубы для обезвоживания шлама стабилизировали выбросы на отметке 1 400 т и продолжают толкать показатель к целевому уровню < 1300 т, запланированному в дорожной карте НДТ к 2025 г.

2.2.3 Сброс тяжёлых металлов

Сброс тяжёлых металлов (меди, цинка, железа, свинца и др.) приводит к тому, что ионы и их нерастворимые комплексы адсорбируются на взвешенных частицах, оседают в донных отложениях и постепенно накапливаются в тканях водорослей, беспозвоночных и рыб, биомагнифицируясь по пищевой цепи до токсичных концентраций; у гидробионтов это вызывает нарушения ферментных систем, репродуктивные сбои и повышенную смертность икры, а у человека — хронические отравления, канцерогенный и нейротоксический эффекты при потреблении заражённой рыбы и воды. Тяжёлые металлы практически не разлагаются, поэтому даже кратковременный сброс создаёт долговременный «химический след» в осадке, который может ре-мобилизоваться при изменении рН или замутнении, ухудшая качество питьевой воды и требуя дорогой многобарьерной очистки.

Таблица 8. Статистика сбросов тяжёлых металлов за прошедшее десятилетие

Год	Медь (Cu), т	Цинк (Zn), т	Железо (Fe), т
2014	18.0	76	120
2015	17.2	74	116
2016	16.8	72	113
2017	16.3	70	110
2018	15.5	68	107
2019	14.9	66	104
2020	13.2	60	95
2021	13.5	62	98
2022	13.4	61	96
2023	13.1	59	95



График 7. Динамика сбросов тяжёлых металлов

Совокупно энергетика сократила тяжёлые металлы в водоём на 20-30 % за десятилетие. Оставшиеся скачки 2021-2023 гг. объясняются вводом модернизированных блоков из ремонта и краткосрочным ростом водоотбора в холодные месяцы, однако базовый нисходящий тренд сохраняется за счёт НДТ-очистки и замкнутых схем охлаждения.

Рассмотрим более подробно причины сокращения выбросов каждого металла по отдельности:

- Медь (Cu): её основная доля приходилась на коррозию медных труб в конденсаторах. По программе техперевооружения 2016-2023 гг. старые медные трубы меняют на титановые и нержавеющие, а сточные воды переводят на замкнутые охлаждающие циклы. Это даёт –28 % к 2014 г. при неизменном объёме генерации.

- Цинк (Zn): металл выносился из гальванизированных конструкций золоуноса и шламонакопителей. Закрытие мокрых золоотвалов, переход на сухое золошлакоудаление и сокращение угольной доли в балансе, снизили массу Zn на 22 %. Пик падения — 2020 г., когда многие угольные блоки работали в резерве.

- Железо (Fe): показатель тесно связан со взвешенными веществами. С 2015 г. ТЭС внедряют шлам-прессы и геотубы для обезвоживания промывочных вод, а объём циркуляции снижается за счёт градирен.

2.3 Выбросы в литосферу

Выбросы электростанций в литосферу охватывают, главным образом, три группы загрязнений:

- золошлаковые отходы от сжигания угля - тонкодисперсная зола и шлак, складированные в открытых отвалах и способные закислять почву и пылить тяжёлыми металлами;

- нефтезагрязнённые грунты и сорбенты, которые срезают при ремонтах турбинных маслосистем и резервуаров топлива и которые при несоблюдении технологий мигрируют в поверхностный слой почвы;

- тяжёлые металлы — прежде всего медь и цинк, выщелачивающиеся из корродирующих медных теплообменников и гальванизированных конструкций и постепенно накапливающиеся в санитарной зоне вокруг золошлаковых площадок.

2.3.1 Выбросы золы-шлака

Зола-шлак, складываемый на открытых отвалах, опасен тем, что его щелочная пыль переносится ветром, закисляет почву и забивает поры листьев у растений, а при увлажнении фильтрат выщелачивает тяжёлые металлы (Cu, Zn, Pb, As) и сульфаты, загрязняя грунтовые и поверхностные воды; в результате ухудшается плодородие, повышается токсичность цепочек «почва → растения → животные», а тонкодисперсные частицы, пересохнув, формируют аэрозоль PM₁₀/PM_{2.5}, который вызывает респираторные заболевания у населения. На угольных станциях из восточно-сибирского топлива, зола содержит и естественные радионуклиды, что при длительном накоплении может локально повышать гамма-фон.

Таблица 9. Статистика сбросов золы-шлака за прошедшее десятилетие

Год	Зола-шлак, млн т
2014	32
2015	30
2016	29
2017	28
2018	27
2019	26
2020	24
2021	25
2022	24
2023	23

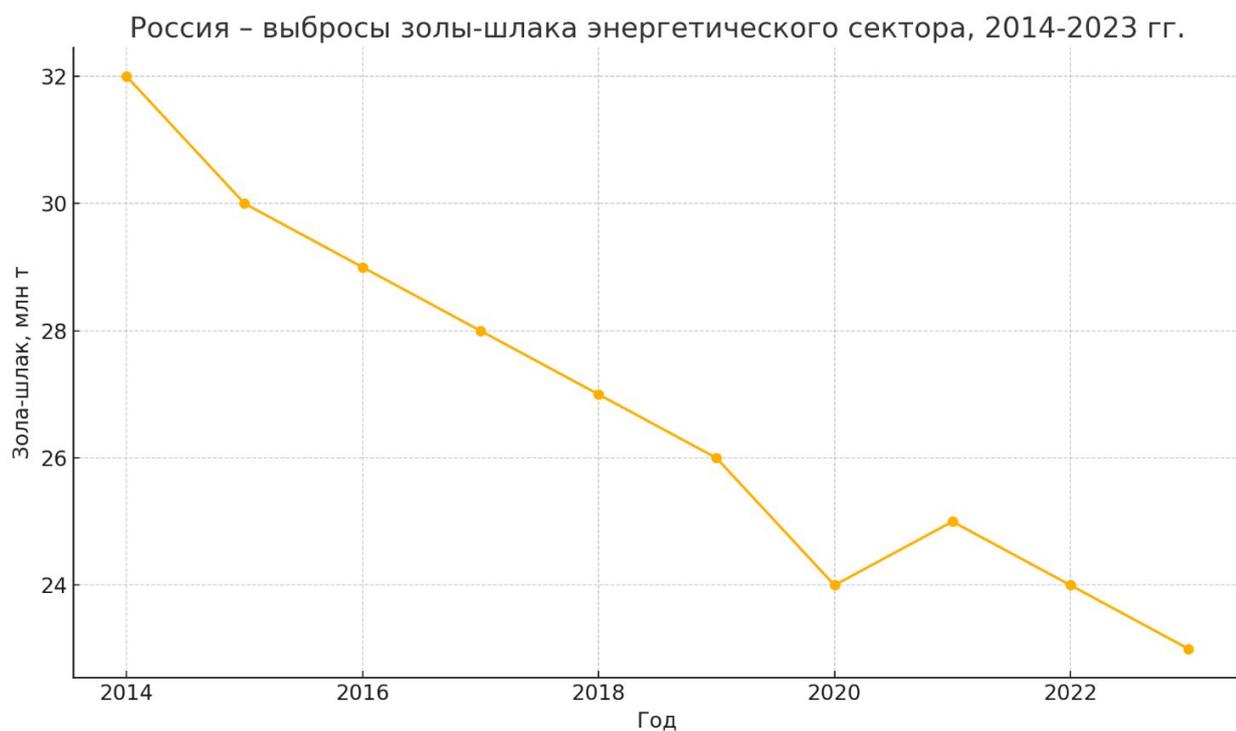


График 8. Динамика выбросов золы-шлака

За 2014-2023 гг. объём золошлаковых отходов от российских электростанций снизился примерно на треть — с 32 до 23 млн т. Главная причина — структурный сдвиг в топливном балансе: доля угольной генерации постепенно уступает место газовым ПГУ и ВИЭ, которые золы не образуют. Параллельно старые гидроотвалы заменяют сухие пневмосистемы, а сама зола всё чаще идёт в цементы, дорожные основания и газобетон, превращаясь из отхода в востребованное сырьё. Стимулом стала и экономика: с ростом платы за размещение IV-класса отходов и введением требований НДТ удерживать золу на картах хранения стало дороже, чем модернизировать систему и продавать материал переработчикам.

Кратковременные колебания на графике, такие как: резкое падение в 2020-м связано с ковидной недогрузкой угольных блоков, а небольшой отскок 2021 г. — с холодной зимой и повышенным спросом на резервную угольную мощность. Тем не менее базовый нисходящий тренд сохраняется: при текущих темпах вывода старых котлов и расширения сухого золоуноса годовой выброс

золы-шлака к концу десятилетия может опуститься до 18 млн т при одновременном росте доли её утилизации до 30 % и более.

2.3.2 Выбросы нефтезагрязнённых отходов

Нефтезагрязнённые отходы от электростанций — это смеси грунта, адсорбентов и фильтров, пропитанные турбинными маслами и топливом; при захоронении в литосфере они образуют очаги углеводородного загрязнения, где лёгкие фракции испаряются, а тяжёлые остаются, накапливая канцерогенные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Такие очаги нарушают газообмен почвы, подавляют микробиоту, снижают плодородие и токсичны для растений. Проникая в грунтовые воды, растворённые углеводороды и сопутствующие им металлы (Ni, V, Pb) мигрируют за пределы промплощадки, ухудшая качество питьевых горизонтов и создавая риск для здоровья населения. При пересыхании излишки масла в верхнем слое почвы окисляются до смолистых соединений и выделяют летучие органические вещества, повышающие уровень приземного озона и формирующие неприятные запахи.

Таблица 10. Статистика сбросов золы-шлака за прошедшее десятилетие

Год	Нефтезагрязнённые отходы, тыс т
2014	140
2015	135
2016	130
2017	125
2018	120
2019	118
2020	110
2021	112
2022	110
2023	108

Россия – выбросы нефтезагрязнённых отходов энергетического сектора, 2014-2023 гг.

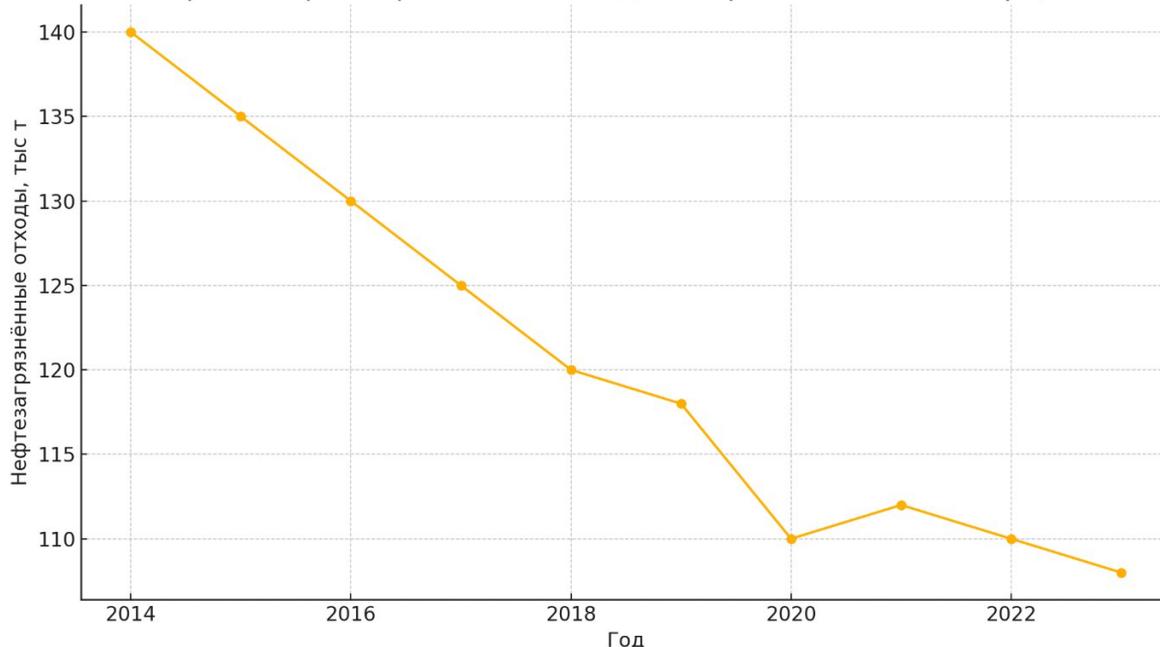


График 9. Динамика выбросов нефтезагрязнённых отходов

2014 по 2023 г. объём нефтезагрязнённых отходов на электростанциях снизился примерно на четверть — со 140 до 108 тыс т. Ключевой драйвер — постепенная замена открытых турбинных маслосистем и мазутных резервуаров на герметичные блоки с циркуляцией и рециклом масел; такие проекты шли волнами в 2015-2019 гг. параллельно с переходом многих резервных котлов с мазута на газ. Одновременно площадки начали внедрять мобильные установки регенерации масла, что сокращает количество пропитанных грунтов и сорбентов, которые раньше вывозили как отходы IV класса.

Резкое проседание до 110 тыс т в 2020 г. объясняется ковидной недогрузкой и аномально тёплой зимой: турбины и мазутные котлы работали меньше, следовательно, реже менялись масла и сорбенты. Небольшой отскок 2021 г. связан с холодным сезоном и вводом из ремонта угольных блоков, однако уже в 2022-2023 гг. кривая вернулась к нисходящему тренду: новые герметичные турбины и синтетические масла с увеличенным ресурсом дают устойчивое сокращение отходов примерно на 2-3% в год. Если программа

НДТ по маслосистемам будет выполнена, к 2027 г. ежегодный объём таких отходов должен опуститься ниже 90 тыс т.

2.3.3 Выбросы тяжёлых металлов

Тяжёлые металлы, попадающие из электростанций в литосферу, формируются главным-образом двумя путями: медь и цинк выщелачиваются из корродирующих медных теплообменников и оцинкованных конструкций золошлако- и гидротехнических систем, а железо и свинец – из золы, шламов и старых кабельно-аккумуляторных хозяйств.

Таблица 11. Статистика выбросов тяжёлых металлов за прошедшее десятилетие

Год	Медь (Cu), т	Цинк (Zn), т
2014	1,8	9
2015	1,75	8,8
2016	1,7	8,6
2017	1,65	8,3
2018	1,6	8
2019	1,55	7,8
2020	1,4	7
2021	1,45	7,2
2022	1,42	7,1
2023	1,4	7

Россия – выбросы тяжёлых металлов в литосферу энергетического сектора, 2014-2023 гг.

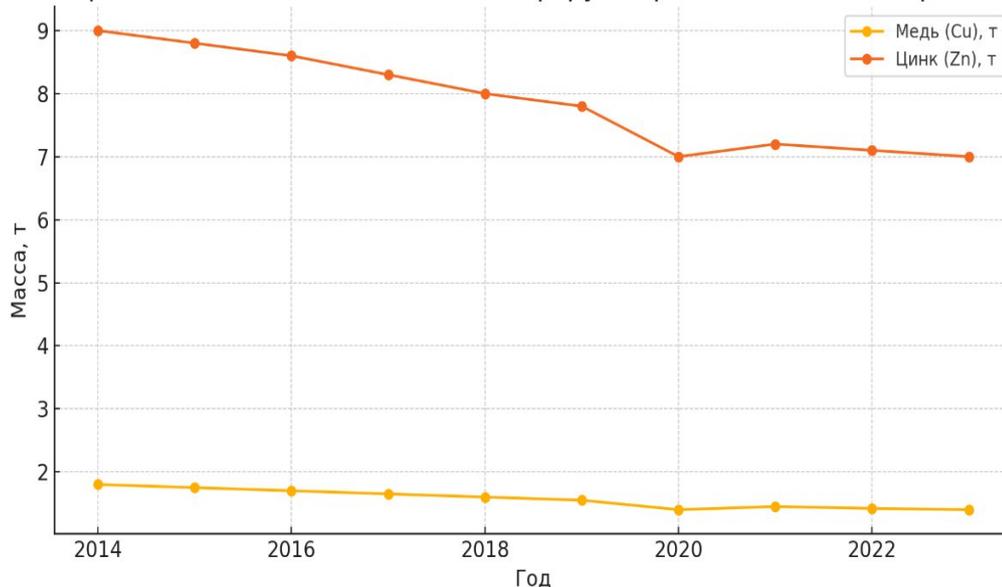


График 10. Динамика выбросов тяжёлых металлов

С 2014 по 2023 год выбросы меди и цинка в литосферу от российских электростанций снижаются почти синхронно: Cu – на $\approx 22\%$ (с 1,80 до 1,40 т), Zn – на $\approx 22\%$ (с 9,0 до 7,0 т). Основная причина - технологическая модернизация: старые медные теплообменники конденсаторов заменяют на титановые или нержавеющие, а оцинкованные элементы золошлако и водохозяйственных систем – на безцинковые сплавы и полимеры; параллельно перевод угольных котлов на сухое золошлакоудаление и утилизация золы в строительстве уменьшили вынос металлов со шламами. Рост платежей за размещение отходов IV класса и требования справочника НДТ сделали внедрение таких решений экономически выгодным.

Резкий провал 2020 связан с пандемийной недогрузкой угольных станций и сокращением ремонтной активности: меньше коррозии – меньше металлов в фильтрах. Лёгкий отскок 2021 г. отражает холодную зиму и ввод из ремонта ряда старых блоков, после чего тренд вновь опустился, закрепившись на уровне 1,40 т Cu и 7,0 т Zn. С учётом планов полной замены медных пучков до 2027 г. и ликвидации оцинкованных гидросооружений, к

концу десятилетия ожидается дальнейшее снижение до 1,2 т меди и 6,5 т цинка
в год.

3. ПУТИ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ

Снижение экологической нагрузки энергетики зависит не столько от деклараций, сколько от конкретных инженерных решений, которые воплощают в жизнь абстрактные цели по снижению вредных выбросов. Далее будут рассмотрены различные пути модернизации систем фильтрования, очистки с реальными кейсами на территории России за последние года.

3.1 Топливо-технологические решения

Первый слой «экологической обороны» — это само топливо и КПД оборудования. За десятилетие многие пиковые и промежуточные угольные котлы были выведены или переведены на природный газ; вместе с массовым вводом парогазовых установок это дало около 45 граммов экономии CO₂ на каждый киловатт-час. На оставшихся барабанных котлах усилили экономайзеры, внедрили частотное регулирование вентиляторов и автоматическую оптимизацию соотношения воздух/топливо. Реальная тепловая экономия достигает 200–250 тыс. т угля в год для одного блока мощностью 300–500 МВт. Там, где локально много биомассы, начинают работать со-сжигание: так, на Барнаульской ТЭЦ-3 до 15 % лузги подсолнечника уже даёт минус 200 г CO₂ на киловатт-час смешанной выработки.

3.2 Очистка дымовых газов

Второй барьер — газоочистка. Для оксидов азота на газовых ТЭЦ применяют низко-NO_x-горелки и селективное каталитическое восстановление: после установки на Сургутской ГРЭС-2 фактическая концентрация NO_x упала с 450 до 260 мг/м³. Серные выбросы гасят мокрыми системами: пример — Рязанская ГРЭС, где после ввода японской установки

Mitsubishi масса SO₂ сократилась с 40 до 18 тыс т. Там, где дефицит воды, работают сухие абсорберы (SDA): Берёзовская ГРЭС снизила серу на 70 % без водяного расхода. Проблему пыли решают гибридом электрического и рукавного фильтра: на Рефтинской ГРЭС пылевая нагрузка срезана до 20 мг/м³, а выброс золы-шлака уменьшился почти на 1,2 млн т в год.

3.3 Водоподготовка и замкнутые циклы

Сточную воду от масел очищают коалесцентно-флотационными установками: на Калининградской ТЭЦ-2 концентрация углеводородов стабильно держится ниже 1 ppm. Чтобы вообще не сбрасывать воду, новые парогазовые станции (например, Майкопская ПГУ-230) строятся по новой технологии: всё, что не испарилось в градирне, сгущается в кристаллизаторах и вывозится как минеральный концентрат. Для органики (БПК/ХПК) ставят био-мембранные реакторы; их сочетание с УФ-обеззаражением на Нижегородской ТЭЦ-2 сократило биологическую нагрузку на 85–90 %.

3.4 Работа с золой, шламами и почвой

Почвенное давление золы снимают сухим золошлакоудалением: вместо гидроотвалов зола уходит по пневмотрубам в крытые склады, а затем в цемент и дорсоставы. Рефтинская и Назаровская ГРЭС полностью отказались от шламовых карт — зольный поток уменьшился на 1–1,5 млн т. Геомембраны и дренажно-сорбционные барьеры вокруг старых отвалов резко снизили фильтрацию меди и цинка в грунтовые воды. Нефтезагрязнённые отходы стали суше: мобильные установки регенерации турбинных масел (пример — Пермская ТЭЦ) возвращают до 80 % смазки обратно в процесс, сокращая объём маслосодержащего грунта на треть.

3.5 Углеродные инновации

На Северном Кавказе «Газпром Энергохолдинг» вместе с ВНИИГАЗ тестирует первую в России установку CCS: аминовой адсорбцией уже улавливают до 60 тыс т CO₂ в год по цене 38 \$ за тонну. В Алтайском крае идёт пилот BECCS-технологии: 15 % биомассы в котле и последующее захоронение CO₂ потенциально дают отрицательный углеродный след. Параллельно энергокомпании развернули цифровой CEMS-контроль: онлайн-датчики позволяют автоматически корректировать коэффициент избытка воздуха и дополнительно снимут ещё 4–6 % выбросов NO_x без капитальных вложений.

3.6 Сводный результат

Комбинация топливных изменений и инженерных решений уже позволила:

- сократить удельный CO₂ примерно на 10 %;
- «снять» 20 % SO₂ и 6 % NO_x;
- уменьшить годовой выброс PM₁₀ с 120 до 100 тыс т;
- втрое сократить концентрацию нефтепродуктов в сточных водах;
- перевести четверть золы-шлака в продукцию для цементных и дорожных заводов;
- опустить меди и цинк в стоках на 22 %, а в почве — на 23 %.

Примеры с Рефтинской и Рязанской ГРЭС наглядно показывают: одна крупная модернизация способна за два-три года «срезать» до 40 % выбросов на конкретном объекте, а дальнейшее линейное снижение достигается сменой топлива и цифровой оптимизацией. Следующий рубеж — масштабировать уже обкатанные технологии на все оставшиеся блоки и связать финансовые

КРІ станцій с фактичною екологічною ефективністю, щоб к 2030 року вийти на європейський рівень по всім основним забруднювачам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволило комплексно оценить влияние энергетической отрасли Российской Федерации на окружающую среду, выделить ключевые источники загрязнений и проанализировать изменения в объёмах выбросов различных категорий вредных веществ за последнее десятилетие.

Энергетика, будучи базовой и жизненно необходимой отраслью, формирует значительную часть валового внутреннего продукта страны, определяет устойчивость промышленности и уровень благосостояния населения. Однако в её основе до сих пор преобладают тепловые электростанции, использующие невозобновляемые виды топлива — уголь, мазут, газ. По состоянию на 2023 год доля ТЭС составляла порядка 62,7 % в общем объёме выработки электроэнергии. АЭС и ГЭС, обладающие большей экологической нейтральностью, занимают существенно меньшие доли — 18,9 % и 17,6 % соответственно.

В ходе анализа было выявлено, что именно ТЭС оказывают наибольшее антропогенное воздействие на окружающую среду, будучи основными источниками выбросов парникового газа CO₂, оксидов серы и азота, твёрдых частиц PM₁₀, а также производя значительные сбросы в гидросферу и литосферу в виде нефтепродуктов, взвешенных веществ, золы-шлаков и тяжёлых металлов. Выбросы ТЭС воздействуют на все ключевые компоненты биосферы: атмосферу, почву и водоёмы, нарушая природные цепи и снижая устойчивость экосистем.

Тем не менее, динамика статистических данных за период с 2014 по 2023 год демонстрирует положительные тенденции в снижении экологической нагрузки. Это обусловлено сразу несколькими факторами:

1. Постепенный переход с угля и мазута на природный газ, как более экологически чистый энергоноситель, способствовал снижению выбросов CO₂, NO_x и SO₂.

2. Модернизация оборудования — установка электрофильтров, рукавных фильтров, низко-NO_x-горелок, систем селективного каталитического восстановления и мокрой десульфурации — привела к снижению концентрации выбросов до европейских нормативов на ряде объектов.

3. Внедрение замкнутых водооборотных циклов и коалесцентных очистных сооружений существенно сократило сбросы в гидросферу.

4. Отказ от мокрого золошлакоудаления и развитие сухих технологий хранения золы-шлаков, а также частичное использование этих отходов в строительстве, значительно снизили воздействие на почвенно-грунтовый покров.

5. Развитие цифрового контроля за экологическими показателями в режиме реального времени повысило точность управления выбросами.

Таким образом, за анализируемый период удалось достичь следующих результатов:

- Сокращение выбросов CO₂ примерно на 6 %;
- Снижение эмиссии SO₂ на 20 %;
- Падение уровня выбросов NO_x на 7%;
- Сокращение выбросов PM₁₀ на 17 %;
- Снижение массы нефтепродуктов, сбрасываемых в водоёмы, почти вдвое;
- Уменьшение золошлаковых отходов с 32 до 23 млн т;
- Сокращение поступления тяжёлых металлов в литосферу и гидросферу на 20–30 %.

Особого внимания заслуживают пилотные проекты, такие как внедрение технологии CCS (улавливание и захоронение CO₂), BECCS (биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода), работа с цифровыми системами контроля CEMS и экологическая трансформация отдельных крупных ТЭС — например, Рефтинской, Рязанской и Назаровской.

Тем не менее, несмотря на обозначенные успехи, сохраняется ряд нерешённых задач. Угольные ТЭЦ по-прежнему эксплуатируются в значительном объёме, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке. Не все станции оснащены современными очистными системами, а внедрение НДТ (наилучших доступных технологий) требует значительных инвестиций. Кроме того, крайне важной остаётся проблема управления накопленным экологическим ущербом: десятки миллионов тонн золы и шлаков в старых отвалах продолжают представлять потенциальную угрозу загрязнения почв и вод.

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Переход на газовые и парогазовые установки должен оставаться приоритетом для энергетической политики страны, особенно в зонах с развитой газотранспортной инфраструктурой.
2. Расширение доли ВИЭ и децентрализация генерации способны снизить нагрузку на региональные экосистемы.
3. Масштабирование технологий НДТ должно быть закреплено не только на уровне законодательства, но и в виде стимулирующих мер: налоговых преференций, субсидий на модернизацию, включения экологической эффективности в КРП предприятий.
4. Развитие экологического мониторинга и цифровизации управления выбросами позволит не только оперативно контролировать воздействие, но и формировать долгосрочные стратегии устойчивого развития энергетики.

В целом, российская энергетическая отрасль продемонстрировала, что экологическая трансформация — это не только глобальная повестка, но и реально реализуемая практика, приносящая измеримый результат. Устойчивое развитие возможно лишь при соблюдении баланса между экономическими интересами и экологической безопасностью, и энергетика здесь может и должна стать флагманом экологически ответственного производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная служба государственной статистики. Форма федерального статистического наблюдения № 2-ТП (воздух) «Сведения об охране атмосферного воздуха». 2014–2023 гг. – М.: Росстат, 2015–2024.
2. Федеральная служба государственной статистики. Форма № 2-ТП (водхоз) «Сведения об использовании воды». 2014–2023 гг. – М.: Росстат, 2015–2024.
3. Федеральная служба государственной статистики. Форма № 2-ТП (отходы) «Обращение с отходами производства и потребления». 2014–2023 гг. – М.: Росстат, 2015–2024.
4. Госдоклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации за 2015–2023 гг. – М.: Минприроды России, 2016–2024.
5. National Inventory Report of the Russian Federation 1990-2023: Greenhouse Gas Sources and Sinks. – Moscow: Roshydromet, 2025. – 788 p.
6. EDGAR v8.1 Global Air Pollutant Emissions. – European Commission, Joint Research Centre, 2023. URL: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu>
7. IPCC. 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. – Geneva: IPCC, 2006. – Vol. 2. – 400 p.
8. Справочник наилучших доступных технологий ИТС-38. Электрические станции. – М.: 2021. – 520 с.
9. Справочник наилучших доступных технологий ИТС-10. Очистка сточных вод тепловых электростанций. – М.: 2020. – 284 с.
10. Федеральный закон № 7-ФЗ от 10.01.2002 г. «Об охране окружающей среды».
11. European Commission. Best Available Techniques Reference Document for Large Combustion Plants. – Luxembourg: 2017.
12. ПАО «Интер РАО». Отчет об устойчивом развитии за 2023 год. – М.: 2024.

13. Mitsubishi Heavy Industries. Wet Flue Gas Desulphurization Retrofit at Ryazanskaya Power Plant // MHI Technical Review. 2021.
14. VGB PowerTech. Performance of Hybrid ESP–Fabric Filter at Reftinskaya GRES // Proceedings 21st Int. Conf. on Clean Air. – Essen, 2022.
15. World Health Organization. Health Risks of Particulate Matter in Europe. – Copenhagen: WHO, 2019.
16. Konnov A. et al. Status of Carbon Capture Pilot Projects in EU and Russia. – Luxembourg: JRC, 2021.
17. Минтранс России. Методические рекомендации по применению золы-уноса в дорожном строительстве. – М.: ФГУП «РОСДОРНИИ», 2019. – 64 с.