

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 504.054:628.5

В.Р. Битюкова¹, В.С. Дехнич², Н.В. Петухова³

ВЛИЯНИЕ ГРЭС НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА ГОРОДОВ РОССИИ

В статье рассмотрены основные тенденции в характере загрязнения атмосферы крупными тепловыми электростанциями. Выделены этапы формирования сети современной энергосистемы России, в процессе которых станции строились все дальше от городов, постепенно смещаясь из крупных в средние и малые города и поселки городского типа. Государственные районные электростанции (ГРЭС) как базовый элемент энергосистемы страны значительно больше зависят от экономической ситуации, чем ТЭЦ. В кризисные годы объем производства и потребления топлива на них сокращается быстрее. Динамика и структура выбросов на ГРЭС определяется сочетанием трех ключевых факторов: загруженностью мощностей, структурой топливного баланса и модернизацией мощностей с созданием новых эффективных очистных сооружений. Вклад газовой генерации на ГРЭС в объем выбросов в три раза меньше, чем в их суммарную установленную мощность. Напротив, доля угольной генерации в суммарном объеме выбросов увеличилась за последние 10 лет до 78%, что в 2,7 раза превышает вклад этих станций в установленную мощность. Современный период характеризуется не столько строительством новых, сколько модернизацией станций первого поколения, что определяет снижение объемов выбросов, изменение их структуры и сжатие ареалов загрязнения. На примере Каширской ГРЭС показано, что в результате модернизации сократился объем выбросов в атмосферу. Наибольший вклад в увеличение приземных концентраций поллютантов вблизи Каширской ГРЭС вносят выбросы взвешенных частиц и диоксида серы, а наименьший – выбросы оксида углерода.

Ключевые слова: выбросы в атмосферу, экология города, топливная энергетика, экология промышленности, энергосистема, Каширская ГРЭС

Введение. Энергетика – одна из базовых отраслей хозяйства и крупнейший загрязнитель окружающей среды. Тепловые электростанции составляют основу электроэнергетики России – 70% мощностей, 64% производства электроэнергии, до 70% общего объема эмиссии парниковых газов [Промышленность..., 2019; IPCC..., 2006]. Доля энергетики в загрязнении атмосферы составляет 21%, в объеме сточных вод – 13%, промышленных отходов 1–4-го классов опасности – 10% [Охрана..., 2019]. Для данной отрасли характерны наибольшие удельные выбросы в атмосферу и самая высокая степень зависимости валовых выбросов от объемов производства [Henkel et al., 2009; Nagvi, Zwickl, 2017]. В России коэффициент корреляции между этими показателями составляет 0,65, что свидетельствует о низком уровне модернизации отрасли [Битюкова, Петухова, 2018].

Исторически в плане ГОЭЛРО, которому в 2020 г. исполнилось 100 лет, конденсационные электростанции⁴, производящие только электрическую энергию, получили название государственных рай-

онных электростанций – ГРЭС, чтобы подчеркнуть место в территориальной структуре производственных связей. С течением времени термин «ГРЭС» потерял свой первоначальный смысл («районная») и в современном понимании означает, как правило, конденсационную электростанцию большой мощности (тысячи МВт), работающую в объединенной энергосистеме наряду с другими крупными электростанциями. Суммарно в 2018 г. вклад ГРЭС в объем производства электроэнергии, газа и воды составил 40%, а доля их в установленной мощности достигает 46%.

В отличие от ТЭЦ, которые не только производят электроэнергию, но и тепло, ГРЭС не обязательно размещать внутри городской застройки. Однако исторически первые станции были размещены в городах, в топливном балансе которых изначально преобладал уголь и торф. Сейчас такие станции оказались в основном в густонаселенных районах страны, где они одновременно выполняют важную роль в производстве электроэнергии и являются крупными источниками загрязнения. В частности, в Мос-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: v.r.bityukova@geogr.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Казахстанский филиал, кафедра экологии и природопользования, преподаватель, e-mail: vodo.ast@gmail.com

³ «И-АР-ЭМ Юрейжа Лимитед» (Великобритания), г. Москва, Трехпрудный переулок, 11/13, строение 3, офис 1, ст. консультант; e-mail: nv.petukhova@mail.ru

⁴ Конденсационная электростанция // Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / под ред. А.М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.

ковской агломерации, где размещались самые первые ГРЭС, на сегодняшний день потребление электроэнергии превышает ее производство в 2,2 раза, дефицит энергобаланса нарастает с 2000 г. и составляет 28,4 млрд кВт·ч [Промышленность..., 2019]. При этом доля топливной энергетики в объеме выбросов от стационарных источников в области одна из самых высоких в стране и составляет почти 40% [Охрана..., 2019]. В условиях растущих требований к качеству окружающей среды сохранение исторически сложившихся производственных мощностей возможно при выработке определенных стратегий модернизации.

Цель работы – полимасштабный анализ факторов формирования загрязнения от ГРЭС, выявление роли исторических условий и энергодифицитности района размещения, изменения мощности станций и топливного баланса при оценке их влияния на загрязнение воздуха и формирование рисков здоровью населения в зависимости от объемов и структуры загрязнения.

Материалы и методы исследования. Информационной базой исследования послужила отраслевая, региональная [Основные..., 2019; Охрана..., 2019] и муниципальная статистика [Показатели..., 2018], а также база данных «Паспорта городов России – 1997–2005» Вычислительного центра Госкомстата России с данными о 974 городах, база данных Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, содержащая данные об объемах и структуре выбросов от сжигания топлива, доле уловленных и обезвреженных веществ [База..., 2018]. Сравнительный анализ и расчет удельных, структурных и динамических коэффициентов позволил оценить основные изменения в загрязнении от ГРЭС в городах и поселках их размещения, выявить основные факторы структуры и динамики выбросов.

Детальное исследование влияния Каширской ГРЭС на территорию города производилось с применением [Методы..., 2017] и включало три этапа.

1. *Расчет максимальных разовых приземных концентраций*, которые формируются в заданной точке пространства в результате рассеяния выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) при наиболее неблагоприятных метеорологических условиях. Максимальные разовые концентрации достигаются при наступлении опасной скорости ветра, вектор которой направлен от источника выбросов к рассматриваемой точке. При скорости ветра выше или ниже опасной приземные концентрации снижаются. В расчете максимальных разовых концентраций не учитывается распределение повторяемости ветра по румбам, что позволяет определить для каждой точки пространства максимально возможную концентрацию ЗВ в условиях штатной работы источника. Величина опасной скорости ветра зависит от скорости выхода и расхода газовойоздушной смеси (ГВС); диаметра и высоты источника; разницы между температурой выброса и температурой воздуха. Чем больше температура ГВС относительно окружающего воздуха, тем больше высота, на которую под-

нимаются частицы ЗВ и, следовательно, меньше их приземная концентрация. Согласно [Методы..., 2017], температура воздуха была принята равной среднему максимуму наиболее теплого месяца года, что позволило оценить концентрацию ЗВ для наилучших условий рассеяния. Расчет состоял из следующих шагов:

1.1. Определение максимальной приземной разовой концентрации ЗВ при выбросе загрязненной ГВС из одиночного точечного источника.

1.2. Определение расстояния от источника, на котором наблюдается максимальная разовая приземная концентрация.

1.3. Определение максимальной приземной разовой концентрации в каждом узле сетки, покрывающей исследуемую территорию с фиксированным шагом.

2. *Расчет среднегодовых приземных концентраций*, формирующихся при метеорологических условиях и значениях выбросов, близких к среднегодовым. Концентрации определялись для каждого узла сетки, покрывающей территорию в радиусе 50 км от дымовых труб ГРЭС, с шагом 1000 м с учетом повторяемости различных направлений ветра.

3. *Расчет индекса загрязнения атмосферы (ИЗА)* для каждого узла фиксированной сетки.

Расчеты ИЗА, максимальных разовых и среднегодовых концентраций производились для взвешенных частиц, диоксида серы, оксидов азота, оксидов углерода. Картографирование полей концентраций производилось только для ЗВ, которые формируют их статистически значимое повышение. Используемые в расчетах параметры приведены в табл. 1.

Результаты исследования и их обсуждение. Размещение объектов энергетики в значительной степени определяет загрязнение большинства городов и даже регионов. Теплоэнергетика отличается высокой концентрацией объектов в ограниченном ареале (особенно это касается ТЭЦ). Риски для здоровья населения от этих производств определяются множеством факторов, но основные – это вид сжигаемого топлива, уровень очистки, высота трубы, через которую отходящие газы поступают в атмосферный воздух, местные климатические условия, близость источников загрязнения к жилью, поскольку было доказано, что загрязнение воздуха твердыми частицами статистически и механически связано с увеличением сердечно-сосудистых заболеваний [Douglas, Dockery, 2007; Pope, 2006].

По времени создания станций, которое в значительной степени определяет особенности их размещения (рис. 1), можно выделить пять этапов.

На начальном этапе в 1914–1947 гг. были созданы 14 небольших станций. Их вклад в современную мощность составляет 10%, большинство станций были реконструированы в 1980-е гг. с увеличением мощности и заменой угля и торфа на газ полностью (Шатурская, Ивановская, Нижегородская, Новомосковская, Среднеуральская, Нижнетурьинская) или частично (Томская, Каширская

Таблица

Значение параметров, использованных в расчете приземных концентраций загрязняющих веществ

Параметр	Значение
Коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы (А)	140
Средний максимум температуры воздуха самого теплого месяца, °С	23,8
Повторяемость различных направлений ветра, %	Северный – 12,5 Северо-восточный – 6,3 Восточный – 8,8 Юго-восточный – 14 Южный – 14,1 Юго-западный – 14,4 Западный – 18,9 Северо-западный – 10
Высота дымовых труб, м	№1 – 150 №2 – 250 №3 – 250
Диаметр дымовых труб, м	№1 – 7,744 №2 – 8,474 №3 – 8,624
Расход газозоодушнoй смеси, м ³	№1 – 65 №2 – 1230 №3 – 1170
Взвешенные частицы, т/год	13 753
Диоксид серы, т/год	4 457
Оксиды азота, т/год	15 245
Оксид углерода, т/год	62

ГРЭС). Продолжают использовать уголь ГРЭС в восточной части страны – Кемеровская, Новосибирская (Левобережная), Майская (Хабаровский край).

Лимитирующим фактором развития энергосистемы в этот период был уровень развития электросетей, поэтому станции размещались в непосредственной близости от потребителей и источников топлива – торфа, угля, в непосредственной близости от жилой застройки, на краю малых городов или поселков (пос. Майский, Комсомольск, Нижняя Тура, Электрогорск, Шатура, Кашира, Балахна, Среднеуральск) и даже крупных городов (Артем, Новомосковск, Томск, Кемерово, Астрахань, Новосибирск). Причем за Уралом станции размещались близко к городу, застройка по мере роста постепенно их обходила, и они оказались в центре города. Так, в Кемерово и Томске ГРЭС имеют более центральное положение, чем все ТЭЦ.

В 1950–1955 гг. было пущено еще 10 относительно небольших ГРЭС, их вклад в существующую мощность составляет всего 7%, поскольку это пик создания Волжского каскада ГЭС. Все станции размещены на краю малого, среднего города или поселка, как правило, отделяясь от селитебной зоны железной дорогой и полосой леса (Щекино, Калтан), дачными участками (Суворов, Серов, Заинск) или водохранилищем (Партизанск, пос. Прогресс). Основным топливом в момент создания был уголь, но постепенно станции были переведены с угля на газ (Щекинская, Серовская), с мазута на газ (Заинская); частично переведе-

на на газ Южноуральская ГРЭС. Сохранили преобладание угля в топливном балансе сибирские и дальневосточные Южно-Кузбасская, Эгвекинотская, Райчихинская, Партизанская, Аркагаалинская, а также Черепетская ГРЭС в Тульской области.

В 1956–1965 гг. создается каркас самых крупных ГРЭС мощностью 1–2,5 ГВт; 12 станций обеспечивают 23,4% мощностей. Они размещаются в основном в средних городах, а также в Невинномысске и Новочеркасске. В этот период для всех станций характерно отдаленное размещение, как правило, в большой промзоне, в 1–5 км от города (Невинномыск, Назарово) или более чем в 5 км от города (Новочеркасск, Кириши, Белово, Зеленогорск). Относительно близко, в 1–1,5 км, но все же изолировано, расположены крупные станции в Конаково, Верхнем Тагиле, Мысках, Невинномысске, Троицке, Назарово.

В европейской части страны ГРЭС строятся на газовом топливе (Невинномысская, Конаковская), постепенно переводятся на газовое топливо с угольного (Новочеркасская, Верхнетагильская, Яйвинская) или мазутного (Киришская ГРЭС). На Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке в топливном балансе сохраняется уголь (Томь-Усинская, Троицкая, Красноярская, Назаровская, Беловская, Сахалинская, Кармановская). Увеличение мощностей на большинстве станций производилось в 2008–2018 гг. за счет парогазовых установок, что не сопровождалось большим приростом выбросов.

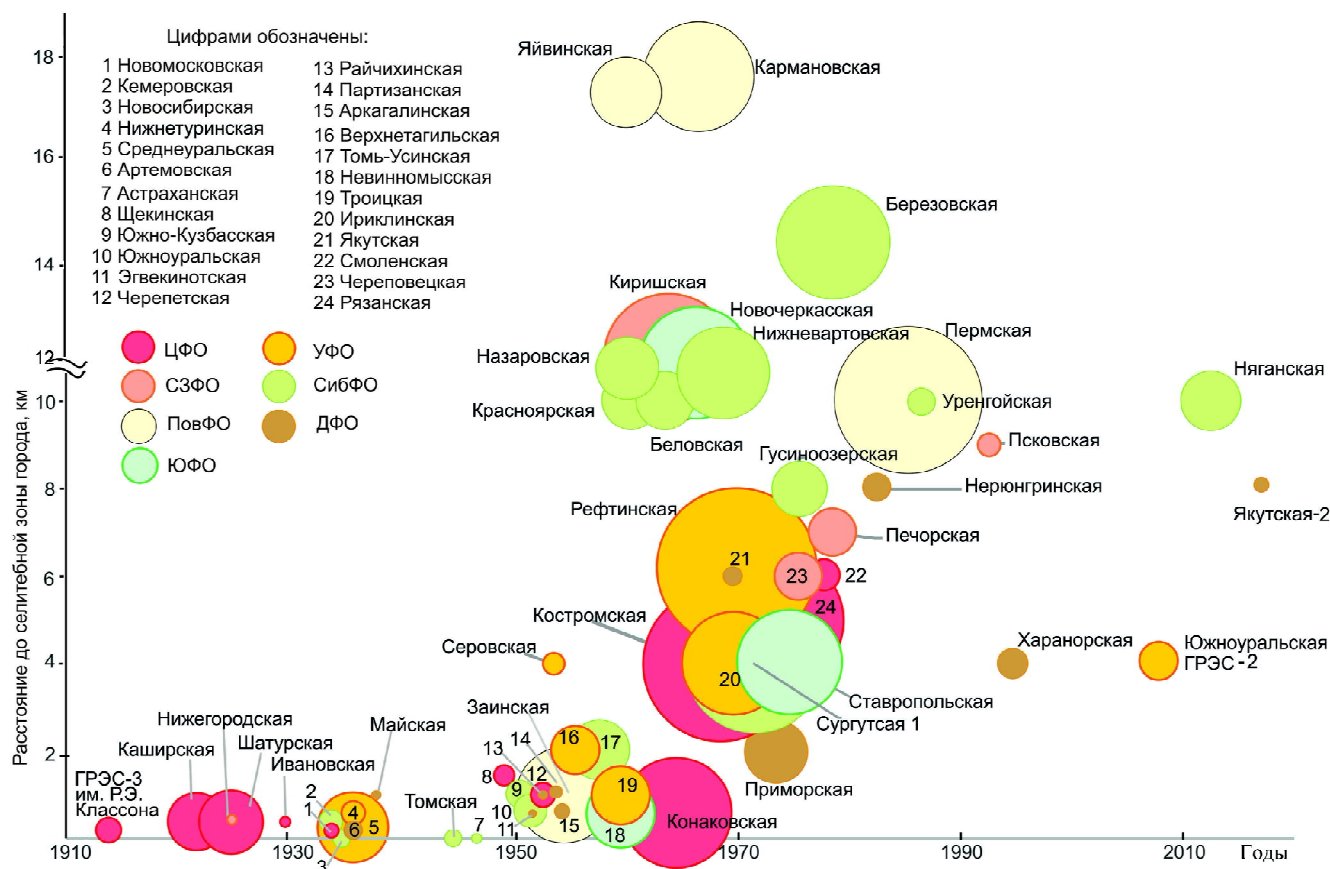


Рис. 1. Размещение ГРЭС относительно границ города в зависимости от времени запуска.

Примечание: размер значка пропорционален установленной мощности станции

Fig. 1. Location of power plants according to the distance from the closest city, date of start-up.

Note: Size of the icon is proportional to the installed capacity of power plant

В период с 1968 по 1995 г. в энергосистему страны была введена 21 ГРЭС, установленная мощность которых составила 57,1% современного уровня. Большинство из них работают в основном на газовом топливе, из угольных это только крупные станции в центре районов его добычи – Рефтинская, Приморская, Нерюнгринская, Березовская, Харанорская. Общим для данной группы является размещение – ГРЭС уходят от крупных городов, минимальное расстояние до селитебных территорий возрастает до 2–5 км. В основном станции размещаются в поселках – Серебряный бор (4–5 км от Нерюнгри), Лимбяха (15 км от г. Новый Уренгой), Озерный Смоленской обл., Энергетик Оренбургской обл., Ясногорск Забайкальского края, Кадуи Вологодской обл., Солнечнодольск Ставропольского края, пос. Рефтинский Свердловской обл., Лучегорск Приморского края. Часть станций размещается в сверхмалых городах с населением меньше 20 тыс. жителей – Дедовичи, Волгореченск, Новомичуринск, Гусиноозерск; 30–40 тыс. жителей – Добрянка, Шарыпово, Печора. Относительно близко к крупным городам строятся только две Якутские станции (на высоком берегу Ленской старицы), две Сургутские станции на попутном газе на берегу Оби и Нижневартовская. То есть ГРЭС размещаются с учетом экологического фактора максимально изолировано от селитебных территорий.

Эта тенденция продолжается в последние годы; в 2008–2019 гг. были пущены четыре ГРЭС: в 4 км от Южноуральска в 5 км от Нягани, на окраине Якутска и в селе Ильинское (Сахалинская область) – единственная небольшая станция на угле. Новый этап трансформации отечественной энергетики и связанного с ней загрязнения связан не столько со строительством станций, сколько с реконструкцией и модернизацией ГРЭС 1-го и 2-го этапов. Это позволяет сохранить мощности в густонаселенных районах, прежде всего Центральной России, при этом сократив выбросы в атмосферу, снизить уровень загрязнения. Например, на Каширской ГРЭС, в результате модернизации 2008–2009 гг. не только была увеличена мощность станции на 21% для покрытия растущего дефицита Московской области, но и сократились выбросы на 27% за один год (с 37 тыс. до 27 тыс. т в 2010 г.). Большие темпы сокращения объема выбросов достигались на станции только в период системного кризиса 1990-х гг. и были связаны с 50%-м спадом производства электроэнергии.

Современный уровень загрязнения воздуха от ГРЭС. ГРЭС независимо от размера являются крупнейшим источником загрязнения в центре своего размещения. В 1990 г. было девять ГРЭС, которые имели объем выбросов более 100 тыс. т, к 1998 г. таких станций осталось всего две (Рефтинская и

Троицкая), а с 2012 г. только Рефтинская. В 2018 г. объем ее выбросов превысил даже уровень 1990 г. и составил 250 тыс. т, что связано с использованием высокосольного экибастузского угля. Масштаб ГРЭС как источника загрязнения зависит не столько от мощности станций, сколько от характера сжигаемого топлива.

Высокий объем выбросов (40–70 тыс. т) в 2018 г. наблюдался у Новосибирской, Приморской, Назаровской и Беловской ГРЭС, Красноярской ГРЭС-2 и Гусинозерской ГРЭС на высокосольном угле, а также лидера по мощности, но работающей на газе Сургутской ГРЭС-1. Кроме Приморской и Назаровской ГРЭС, где объем выбросов в последние годы стабилизировался, остальные станции снижали объемы выбросов в кризисный период и увеличивали в период экономического роста, что связано со стратегией использования мощностей. При снижении выработки выводятся в резерв наименее эффективные фонды.

Средний объем выбросов (10–40 тыс. т) характерен для относительно небольших (Харанорская, Артемовская, Нерюнгринская, Кемеровская, Черепетская) или средних по мощности угольных станций, сокративших объем загрязнения, поставивших системы очистки (Томь-Усинская и Троицкая), крупных станций на газовом топливе (Костромская, Рязанская, Нижневартовская), а также станций, частично переведенных на газовое топливо – Томской ГРЭС-2 и Южноуральской ГРЭС-1.

Умеренный объем выбросов (1–10 тыс. т) формируется от небольших угольных станций на Дальнем Востоке (Райчихинская, Майская, Саха-

линская, Партизанская), а также средних по мощности газовых или частично переведенных на газ (Череповецкая, Смоленская, Новочеркасская).

Незначительный объем выбросов (до 1 тыс. т) фиксируется на небольших (30–250 МВт) станциях в отдаленных районах. Это угольные Эгвекинотская, Аркагалинская, Сахалинская ГРЭС-2.

Топливный баланс и возраст оборудования определяют и удельные выбросы (в расчете на объем произведенной энергии). Самые низкие удельные выбросы имеют центры современных парогазовых установок, значительно ниже не только уровня центров, где расположены электростанции со старым оборудованием, использующие уголь в качестве топлива (Суворов, Мыски, Верхний Тагил), но и центров размещения относительно новых крупных станций, использующих газ (Волгореченск, Добрянка) [Крылов и др., 2005].

Динамика выбросов в атмосферу характеризуется общим трендом к сокращению, но тенденции неоднократно менялись. В 1990-е гг. объем выбросов энергетики сокращался темпом на 5% медленнее, чем в целом по промышленности. Основное сокращение наблюдалось именно на ГРЭС, что было связано со спадом производства. В 1998–2018 гг. выбросы вида деятельности «производство, распределение электроэнергии, пара, газа и воды» сократились на 14%, а выбросы ГРЭС в 2 раза.

За период с 2008 по 2018 г. выбросы от энергетики сокращались немного медленнее, чем промышленные выбросы в целом (рис. 2), в результате ее доля в загрязнении атмосферы страны имеет небольшую, но устойчивую тенденцию к увеличению

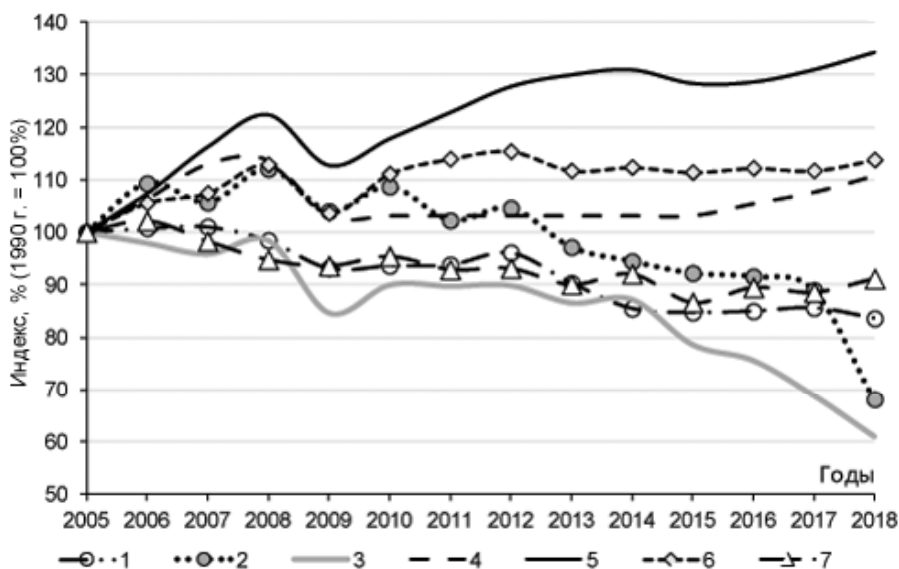


Рис. 2. Динамика объемов производства и выбросов от стационарных источников, энергетических объектов и ГРЭС в 2005–2018 гг.: 1 – выбросы в атмосферу от стационарных источников; 2 – выбросы от вида деятельности «обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха»; 3 – выбросы ГРЭС; 4 – промышленное производство (в ценах 2005 г.); 5 – ВВП (в ценах 2005 г.); 6 – производство электроэнергии тепловыми электростанциями; 7 – теплоэнергия

Fig. 2. Dynamics of production volumes and emissions from stationary sources, energy facilities and state district power stations in 2008–2018: 1 – emissions into the atmosphere from stationary sources; 2 – emissions from the type of activity "provision of electric energy, gas and steam; air conditioning"; 3 – emissions from the state district power station; 4 – industrial production (in 2005 prices); 5 – GDP (in 2005 prices); 6 – electricity production by thermal power plants; 7 – heat energy

(от 19,5 до 22% за период с 2008 по 2018 г.). Выбросы ГРЭС сокращались на 7% быстрее, чем отрасль в целом. Отсутствует статистически значимая корреляция между динамикой выбросов от стационарных источников и объемами ВВП, промышленного производства и объемами производства электроэнергии, вероятно из-за того, что выводились из эксплуатации наиболее старые энергоблоки, продолжался перевод на газ и другие изменения, способствующие рассогласованию трендов производства и загрязнения. Наблюдается зависимость только между объемами производства тепловой энергии и выбросами от энергетики (коэффициент корреляции 0,64 с уровнем значимости 95%).

Динамика по разным станциям определялась вводом или, напротив, выводом мощностей, изменениями в объемах производства, структуре топлива и уровнем очистки отходящих газов. На 1 т у. т. сожженного угля в атмосферу выбрасывается твердых и газообразных ЗВ 25–70 кг, мазута – 39–47 кг, а газа – 1,6–10 кг [Сжигание..., 2017].

Наибольший рост объемов выбросов за период с 2005 по 2018 г. был связан с введением станций в эксплуатацию в Нягани, Харанорской, Сахалинской ГРЭС-2 в пос. Томаринский или запуске на полную мощность Артемовской в Приморском крае, расширении Уренгойской, Нижневартовской, Якутской ГРЭС.

На крупных станциях с устаревшим оборудованием конца 1960-х – начала 1970-х гг. с минимальным обновлением наблюдается *увеличение выбросов на 10–100%* при росте производства, причем как на угольных ГРЭС с высокой степенью очистки (86–90%), достигнутой за счет улавливания твердых частиц, так и на газовых с уровнем очистки 0,5–2,5%. Особую опасность представляет их расположение в крупных городских агломерациях (Новосибирская, Нерюнгринская, Рефтинская, Красноярская, Сургутская, Киришская ГРЭС).

Сокращение на 20–40% связано с двумя основными причинами: модернизацией оборудования и сокращением спроса на электроэнергию. Так, сокращение выбросов Назаровской ГРЭС было достигнуто благодаря реализации инвестиционной программы модернизации седьмого энергоблока, позволившей увеличить его мощность и сократить выбросы оксидов азота. Аналогичное сокращение выбросов было зафиксировано для Кемеровской ГРЭС, на которой в 2012 г. произошла замена оборудования; Томь-Усинской ГРЭС в г. Мыски, где в 2014 г. также проведена масштабная реконструкция энергооборудования; Невинномысской ГРЭС, для которой в 2011 г. реализована инвестиционная программа, направленная на увеличение установленной мощности и улучшение экологических и производственных параметров. В свою очередь, сокращение выбросов Печорской ГРЭС можно связать с ограничением востребованности электроэнергии на местном рынке.

Сокращение объемов выбросов на 40–80% характерно для ГРЭС с малыми объемами выбро-

сов (Астраханская ГРЭС, ГРЭС-3 им. Классона, Партизанская ГРЭС, Эгвекинотская ГРЭС), а также для ГРЭС, работающих на газе: Костромская, Нижне-Тушинская, Ставропольская, Средне-Уральская, Заинская ГРЭС. Среди ГРЭС, работающих на смешанном топливе, сокращение также было характерно для Рязанской и Южно-Уральской, степень очистки отходящих газов которых составляет 83–94%. Существенное сокращение выбросов Сахалинской ГРЭС связано с ее постепенным выводом из эксплуатации, которая завершилась полностью в 2019 г.

Наиболее интенсивное сокращение наблюдалось на различных по объемам выбросов станциях. Среди крупнейших загрязнителей выбросы сократили угольные станции – Троицкая и Черепетская ГРЭС, благодаря крупным программам модернизации оборудования, которые включали замену газоочистного оборудования и электрофильтров до уровня очистки 93,7%. В январе 2017 г. также было выведено из эксплуатации неэффективное оборудование второй очереди Черепетской ГРЭС, что снизило ее установленную мощность до 450 МВт. Модернизационные мероприятия также проходили и на Новочеркасской ГРЭС.

Структура выбросов. Многочисленные исследования подтверждают, что топливный баланс является определяющим для структуры выбросов не только городов [Bityukova, Kasimov, 2015], но и стран [European..., 2015; Zhu et al., 2020]. В России основные изменения в структуре топливного баланса, его диверсификации происходили в пореформенный период. В последние 20 лет доля газа в топливном балансе возрастала, но медленно [Дмитриевский и др., 2013].

Работа ГРЭС значительно больше зависит от экономической ситуации, чем работа ТЭЦ, в кризисные годы объем производства и потребления топлива на них сокращается быстрее: угля и газа на 6–11% быстрее, а мазута, напротив, на 20% медленнее. В результате вклад газовой генерации на ГРЭС в объем выбросов в 2 раза меньше, чем в их суммарную установленную мощность в 1998 г., и в 3 раза меньше, чем в 2018 г. Напротив, доля угольной генерации в суммарном объеме выбросов увеличилась до 78%, что в 2,7 раза превышает вклад этих станций в установленную мощность.

Меняется и структура выбросов: при использовании газа 60% приходится на СО и по 20% на NO₂ и углеводороды. При использовании мазута доля твердых частиц минимальна и не превышает 0,5%, немного более 30% составляет вклад СО и углеводородов, 5–7% составляет выброс NO₂, а оставшаяся часть (около 25%) – SO₂, определяемая сернистостью используемой нефти [Сжигание..., 2017]. Наиболее опасны выбросы от сжигания угля, поскольку более трети выбросов составляют твердые частицы золы, содержащие комплекс микроэлементов, в том числе токсичных [Dry..., 2003; The World..., 2008; Расуна et al., 2010; Юдович, Кертис, 2015]. С потреблением угля связывают эмиссию

восьюми цветных металлов (Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Sb, Hg и Au) в количестве 5,3 кг/т сожженного угля, однако эта цифра сильно отличается в зависимости от качества топлива и принятых стандартов очистки дымовых газов на тепловых электростанциях [Kumar, Jain, 2010; Tian et al., 2014].

Более 70% мощностей ГРЭС в азиатской части России работает на твердом топливе, и выбросы от энергетических установок составляют более 50–60% от общего потока загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников. Зольность отечественных углей колеблется в широких пределах (8–55%) [ГОСТ Р 51586-2000, 2003; ГОСТ Р 51972-2002..., 2003а; ГОСТ Р 51971-2002..., 2003б]. Соответственно изменяется и запыленность дымовых газов, достигая для высокозольных углей 60–70 г/м³ [ГОСТ Р 50831-95..., 1996]. Средняя концентрация взвешенных частиц в атмосферном воздухе городов азиатской части России на 30% выше, чем в городах европейской части – соответственно, 143 и 110 мкг/м³ [Ежегодник..., 2019]. В европейской части страны по структуре топливного баланса и выбросов в атмосферу выделяется Тульская область, где расположена Черепетская ГРЭС, работающая на угле улучшенного качества Кузнецкого бассейна (марки «Д» и «Г») с повышенной теплотворной способностью и зольностью 8,2–10,1%.

Несмотря на достаточно высокий уровень очистки от твердых частиц, они в значительной степени определяют объемы выбросов угольных станций, качество воздуха и влияние на здоровье в городах [Ревич, 2018; Грачев, 2019; Timofeev et al., 2019]. Так, сравнение общей концентрации взвешенных веществ, измеренных в районе расположения Черепетской ГРЭС, с нормативами ВОЗ, показывает, что на расстоянии до 4 км от ГРЭС качество атмосферного воздуха в настоящее время может считаться неудовлетворительным [Демин и др., 2001].

Различные виды топлива используют станции в регионах, богатых всеми ресурсами, имеющих крупные нефтеперерабатывающие заводы (Коми), либо увеличивающих долю газа для улучшения состояния воздушного бассейна (Челябинская и Свердловская области). Поэтому в структуре выбросов европейских городов-центров размещения ГРЭС именно они определяют преобладание в структуре выбросов оксидов азота, СО и углеводородов при использовании газа, а в восточных центрах угольных станций значительно повышена доля твердых частиц (рис. 3).

Основная модернизация очистных сооружений угольных ГРЭС запаздывает. Фактически достаточно высокий уровень очистки отходящих газов, достигнутый на угольных станциях, не растет в последние годы, и динамика выбросов определяется



Рис. 3. Объем и структура выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от ГРЭС, 2018 г.

Fig. 3. The volume and structure of emissions of pollutants into the atmosphere from the state district power station, 2018

в большей степени изменением эмиссии твердых веществ и SO_2 , линейный коэффициент корреляции (при уровне значимости 95%) между изменением и объемом их эмиссии и суммарным объемом выбросов составляет 0,66–0,69 (рис. 4). Топливный баланс остается ведущим фактором загрязнения городов, поскольку модернизационные возможности на действующих энергоблоках исчерпаны при нынешнем уровне инвестирования, простые системы установлены.

Распространение ЗВ в пространстве зависит не только от объема и структуры, но и от высоты трубы станции. На момент строительства для станций 1-го и 2-го этапов трубы были невысокими, а затем были увеличены до 160–180 м. Ареал загрязнения расширился до 7–25 км, в пределах которого ПДК по основным загрязняющим веществам превышались незначительно. На Каширской ГРЭС еще в 1966 г. была построена первая в СССР труба высотой 250 м. Поэтому даже реконструированные станции 1-го этапа нуждаются в изменении топливного баланса.

Оценка воздействия Каширской ГРЭС. Каширская ГРЭС является примером сокращения выбросов и опережающего сокращения плотности загрязнения, сжатия (сокращения площади) ареала при изменении топливного баланса. Станция изначально строилась на угольном топливе. Постепенно наращивая мощность, она диверсифицировала топливный баланс, и к 1990 г. уголь составлял 21%, мазут – 16%, газ – 63%. В период кризиса 1990-х гг. объем производства и потребляемого топлива сократился на 34%, что значительно меньше, чем в среднем по отрасли, поскольку Московская область в наименьшей степени сократила энергопотребле-

ние. В структуре топливного баланса количество угля сократилось в наименьшей степени, и доля его в структуре топливного баланса возросла до 27%, а доля газа сократилась до 57%. В результате объем выбросов сократился с 77 тыс. т до 57 тыс. т, причем в наименьшей степени сократились выбросы твердых веществ. После 2000 г. количество угля, потребляемого станцией, сокращалось, к тому же прекратилось использование подмосковного бурого угля, постепенно проводилась реконструкция. Помимо технического перевооружения третьего энергоблока, проведенного в 2005 г., к 2018 г. сократился объем электроэнергии, вырабатываемый станцией. Совместное действие этих факторов привело к существенному сокращению выбросов ГРЭС: от 40 тыс. т в начале 2000-х до 7 тыс. т в 2018 г.

Результаты расчета максимально разовых приземных концентраций, формирующихся при рассеянии выбросов Каширской ГРЭС в условиях наиболее опасных скоростей ветра, показали, что воздействие выбросов ГРЭС не превышает предельно допустимых норм. Ни по одному из рассмотренных веществ концентрация не превышает ПДК. Максимальную среди всех рассмотренных веществ концентрацию формируют выбросы взвешенных частиц, однако и эта концентрация составляет не более 0,115 ПДК. Наименьшая концентрация формируется в результате выбросов оксида углерода. Она не является статистически значимой и составляет не более $1,9 \cdot 10^{-4}$ ПДК.

Пространственная дифференциация максимальных разовых концентраций схожа по каждому из рассмотренных веществ. Выделяется зона низких

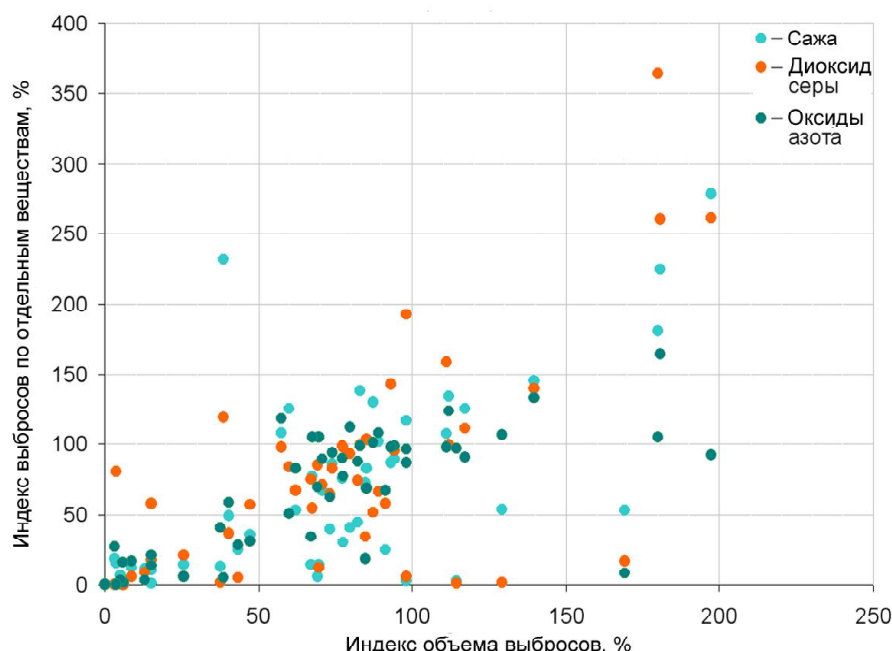


Рис. 4. Взаимосвязь между индексом объема выбросов в атмосферу и индексом объема выбросов отдельных компонентов эмиссий для ГРЭС России, 2008–2018 гг. (2008 г. = 100%)

Fig. 4. Correlation between the index of the emission amount and the index of the emission of individual pollutants for the Russian power plants, 2008–2018 (2008 g. = 100%)

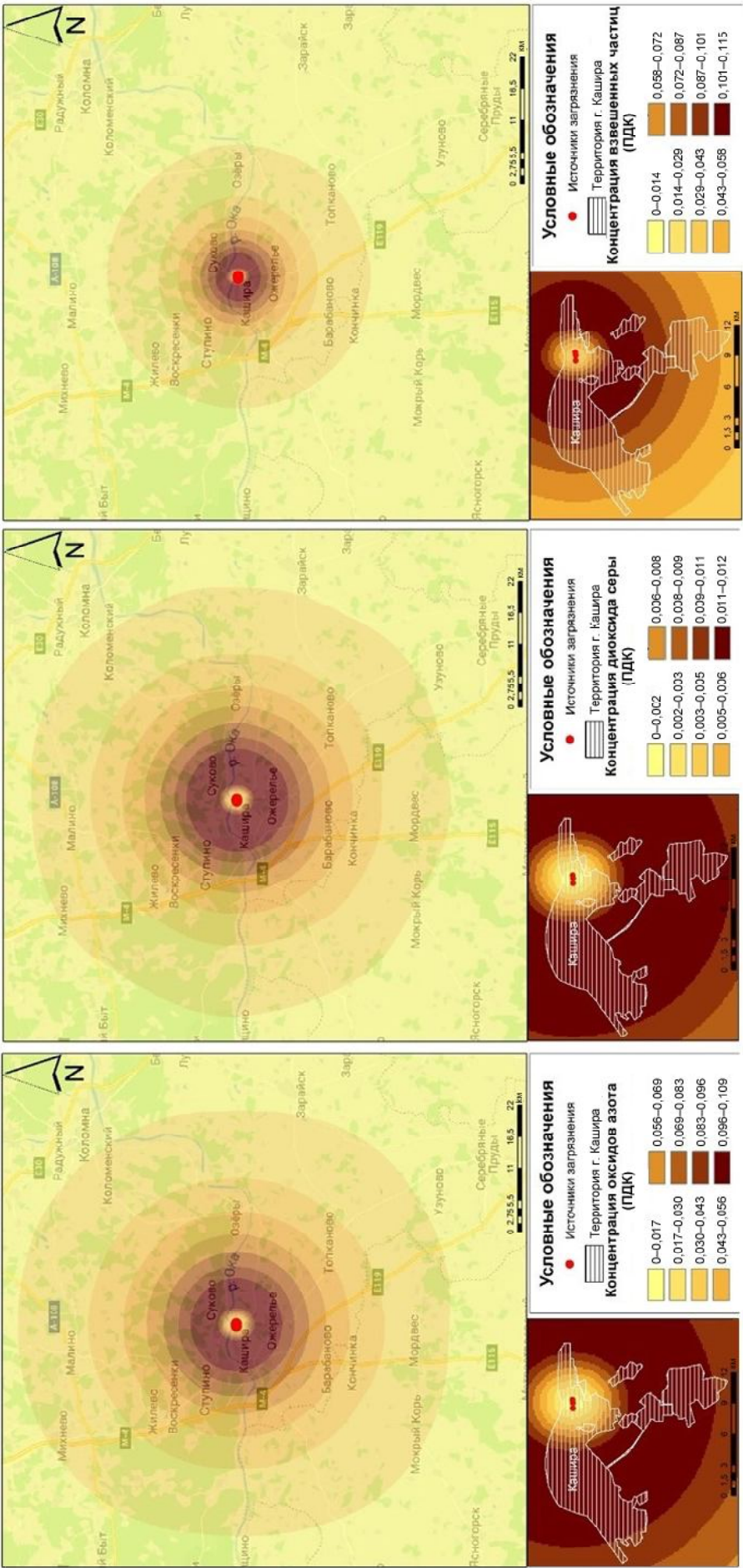


Рис. 5. Максимальные разовые концентрации основных загрязняющих веществ, формирующиеся в результате рассеяния выбросов Каширской ГРЭС (без учета фоновых концентраций)
Fig. 5. Maximum one-time concentrations of main pollutants as a result of dispersion of the Kashirskaaya regional power plant emissions (not including the baseline concentrations)

концентраций в непосредственной близости от источников выброса, связанная с наличием так называемой ветровой тени, характерной для высоких источников. За зоной низких концентраций следует зона их увеличения, в которой достигается ее максимально возможное значение, после чего концентрация монотонно снижается до границ исследуемой области. Различия радиусов ареалов для отдельных ЗВ (от 2,5 км для взвешенных частиц до 6,5 км для диоксида серы) обусловлены разницей скоростей оседания ЗВ. Наибольшие ареалы воздействия характерны для диоксида серы. В условиях действия наиболее опасных скоростей ветра существенная часть г. Кашира находится в зоне с максимальной

среди исследуемой территории концентрацией загрязняющих веществ (рис. 5). Поле максимальных разовых концентраций оксида углерода не описывается по причине их крайне низкой величины, сопоставимой с погрешностью расчета.

Среднегодовые концентрации, формирующиеся в результате рассеяния выбросов Каширской ГРЭС, также находятся в пределах допустимого уровня. Максимальные концентрации среди рассмотренных веществ характерны для взвешенных частиц, однако и они не превышают 0,004 ПДК.

В пределах рассмотренной территории (рис. 6) формируется три зоны с повышенной концентрацией веществ.

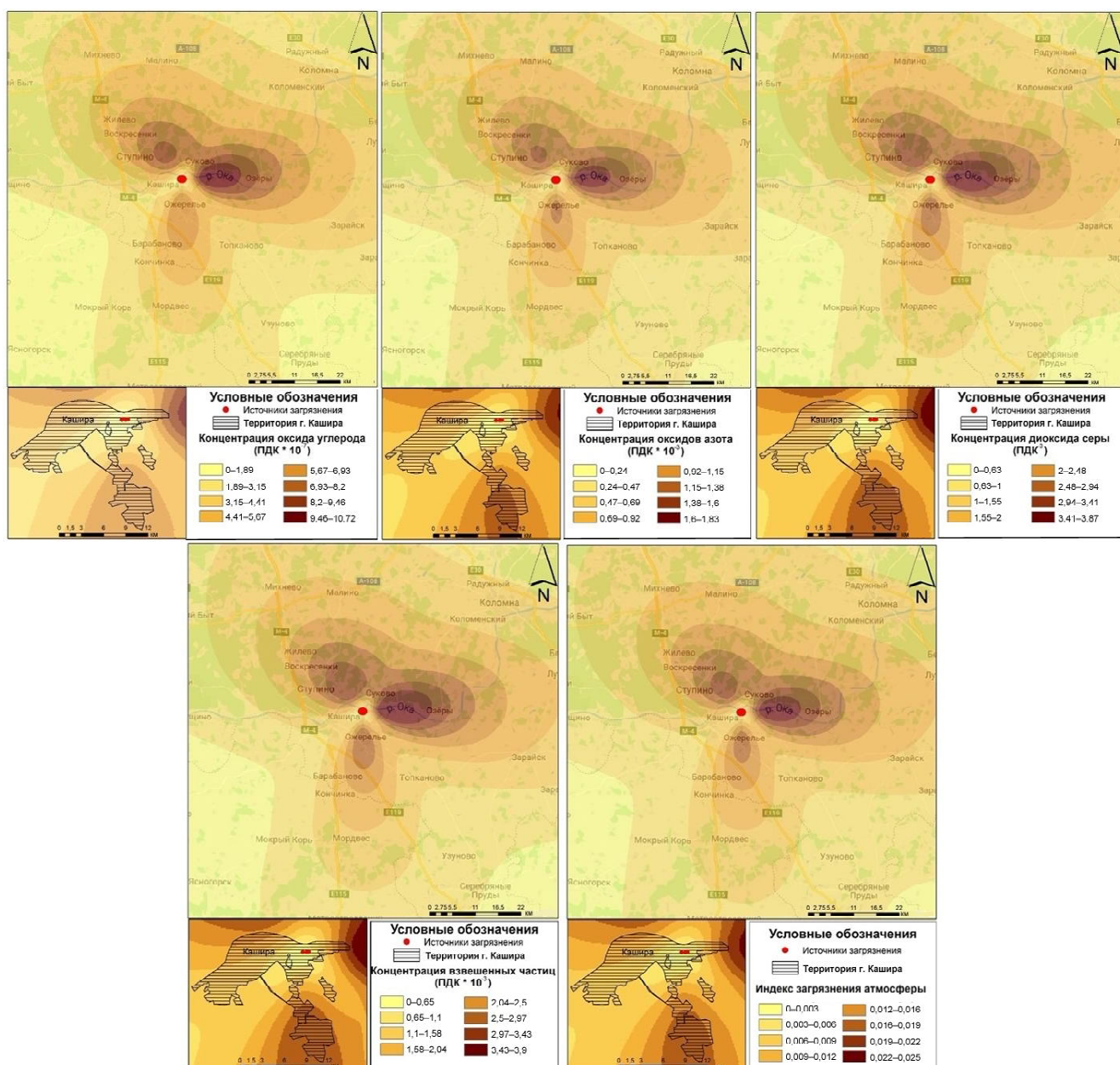


Рис. 6. Среднегодовые концентрации основных загрязняющих веществ и индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), формирующиеся в воздухе в результате рассеяния выбросов Каширской ГРЭС (без учета фоновых концентраций)

Fig. 6. Average annual concentrations of main pollutants and air pollution index as a result of dispersion of the Kashirskaya regional power plant emissions (not including the baseline concentrations)

Первая зона расположена на удалении 4–18 км к востоку от Каширской ГРЭС. В пределах этой зоны наблюдаются абсолютные максимумы среднегодовых концентраций по каждому из рассмотренных веществ.

Вторая зона расположена к северо-западу от ГРЭС на удалении 3–15 км. В пределах зоны формируется локальный максимум концентраций ЗВ (около 75% от абсолютного максимума).

Третья зона повышенной концентрации расположена к югу от ГРЭС на удалении 4–12 км. Локальный максимум концентрации, формирующийся в ее пределах, составляет около 65% от абсолютного.

Наличие зон повышенной среднегодовой концентрации загрязняющих веществ объясняется режимом ветра в пределах исследуемой территории, а конфигурация зон коррелирует с повторяемостью ветра, поэтому территориальная структура ареала загрязнения в значительной степени сохраняется. Предшествующие расчеты, сделанные в 1990–2005 гг., фиксировали, что при в три раза больших выбросах к западу от станции на расстоянии до 10 км и до 2–5 км на восток также формировалась вытянутая с севера на юг так называемая «теневая зона», а основной участок загрязнения находился к востоку. При пятикилометровом удалении от источника начинается увеличение концентрации, максимум индекса концентрации на расстоянии 15 км наблюдается с северной и южной сторон, а максимум на западе удален от станции на 20–25 км [Битюкова и др., 2003]. Однако плотность загрязнения в пределах каждой из этих зон сократилась в 7–10 раз, и концентрация всех загрязняющих веществ не достигает ПДК.

Для исследуемой территории величина ИЗА варьирует от 0 до 0,025, что соответствует невысокой интенсивности воздействия. Пространственное распределение ИЗА наиболее близко к распределению концентраций взвешенных частиц, так как именно это загрязняющее вещество вносит решающий вклад в его величину (см. рис. 6).

Таким образом, выбросы Каширской ГРЭС не приводят к превышению предельно допустимых концентраций ни в условиях, близких к среднегодовым, ни в условиях наиболее опасных скоростей ветра. Наблюдается три зоны накопления загрязняющих веществ, в пределах которых их концентрация увеличивается более чем в три раза от среднего значения при метеорологических условиях, близких к среднегодовым.

В условиях опасных скоростей ветра наблюдается превышение концентраций более чем в четыре раза относительно средних на удалении около 2,5–6,5 км. При этом для быстро оседающих взвешенных частиц максимум концентрации достигается ближе к источнику, а для хорошо рассеивающихся диоксида серы и оксидов азота – дальше от источника выбросов.

Наибольший вклад в загрязнение вносят выбросы взвешенных частиц и диоксида серы. Выбросы оксидов азота несколько менее значимы с точ-

ки зрения увеличения приземных концентраций. Приземные концентрации оксида углерода крайне незначительны ввиду небольшого объема выбросов этого вещества, а также его низкой скорости оседания.

Выводы:

– основные структурные сдвиги в производстве электроэнергии и структуре топливного баланса произошли в годы системного кризиса 1990-х гг. ГРЭС, которые значительно больше реагируют на экономическую динамику, сократили производство больше, чем ТЭЦ, топливный баланс их трансформировался медленнее. В последние годы стагнации нет четкой зависимости объемов выбросов от объемов производства электроэнергии, рост загрязнения наблюдался на станциях, построенных на 3-м этапе и не прошедших масштабную реконструкцию, для них приоритетным является обновление оборудования. Для ГРЭС, размещенных на поздних этапах на расстоянии около 15 км от селитебных зон, приоритетным является увеличение газа в структуре топливного баланса;

– изменения в структуре выбросов происходят под влиянием структуры топливного баланса, которая также стабилизировалась в последние годы, и в меньшей степени при внедрении систем очистки. Выбросы сокращаются в основном за счет твердых частиц, поскольку именно по ним достигается высокая (до 90%, но немного ниже лучших мировых стандартов) степень очистки, а на газовых станциях, где в структуре выбросов преобладают СО, углеводороды и оксиды азота, степень очистки составляет 5–15%;

– с экологической точки зрения ГРЭС более эффективны, чем ТЭЦ, по удельному загрязнению на единицу продукции, по наличию эффекта согласования тенденций объемов производства и загрязнения. Однако их роль в энергетической системе страны по мере снижения энергоемкости экономики, развития сети высоковольтных ЛЭП, структурных сдвигов в производстве, усилении роли возобновляемых источников энергии обуславливает то, что именно на них в первую очередь сокращается производство;

– в современных условиях глубина модернизации будет определять сдвиги в загрязнении и позволит эксплуатировать станции 1-го и 2-го поколений в энергодефицитных районах на основе новых стандартов. На примере Каширской ГРЭС, одной из старейших в стране и расположенной в пределах крупнейшей городской агломерации, подтверждено, что стратегия размещения ГРЭС с высокими трубами за пределами селитебных территорий привела к тому, что при существенном сокращении выбросов от ГРЭС быстрее, чем от топливной энергетики в целом, плотность загрязнения (отношение объема выбросов к площади ареала рассеяния) сократилась еще быстрее. При существующем уровне снижения объема выбросов ЗВ при сохранении высоты труб, рассчитанных на объемы выбросов предыдущего периода ускоренной индустриализации, можно говорить о фактическом отсутствии ареала загрязнения, т. е. отсутствии превышений ПДК. Однако

структура поля распределения загрязнения вокруг источника сохраняется, наибольшие уровни концентрации наблюдаются для твердых частиц, что создает повышенную опасность, а наименее загрязненные территории находятся в непосредственной

близости от станции. Одновременно, влияние в значительной степени смещается за пределы городских территорий, что вписывается в общий тренд сдвигов атмосферного загрязнения, характерного для большинства отраслей промышленности.

Благодарности. Работы выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30004) и в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Битюкова В.Р., Бурденко В.О., Урезченко В.М. Новые методы изучения ареалов атмосферного загрязнения предприятий теплоэнергетики (на примере Московской области) // Проблемы региональной экологии. 2003. № 5. С. 29–39.
- Битюкова В.Р., Петухова Н.В. Региональные и субрегиональные контрасты промышленного загрязнения воздушного бассейна России в 2008–2016 гг. // Экология и промышленность России. 2018. № 5. С. 17–23. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-5-17-23.
- ГОСТ Р 51586-2000. Угли бурые, каменные и антрациты Кузнецкого и Горловского бассейнов для энергетических целей. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 2003. 10 с.
- ГОСТ Р 51972-2002. Угли Восточной Сибири для энерготехнологических целей. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 2003а. 7 с.
- ГОСТ Р 51971-2002. Угли Восточной Сибири для энергетических целей. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 2003б. 6 с.
- ГОСТ Р 50831-95. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Издательство стандартов, 1996. 24 с.
- Грачев В.А. Энергетические технологии и устойчивое развитие // Экология и промышленность России. 2019. № 10. С. 56–60. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-61-65.
- Демин В.Ф., Васильев А.П., Крылов Д.А. Процедуры и методы сравнительной оценки экологического риска для разных способов производства электроэнергии // Проблемы оценки риска загрязнения поверхностных и подземных вод в структуре ТЭК: сб. науч. тр. / ОАО «Газпром»; ООО «ВНИИГаз». М.: Наука, 2001. С. 135–145.
- Дмитриевский А.Н., Мастепанов А.М., Кротова М.В. Энергетические приоритеты и безопасность России (нефтегазовый комплекс) / под ред. А.М. Мастепанова. М.: ООО «Газпром экспоз», 2013. 336 с.
- Крылов Д.А., Крылов Е.Д., Путинцева В.П. Оценки выбросов в атмосферу SO_2 , NO_x , твердых частиц и тяжелых металлов при работе ТЭС, использующих кузнецкий и канско-ачинский уголь // Бюллетень по атомной энергии. 2005. № 4. С. 32–36.
- Ревич Б.А. Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. XXIX. № 3. С. 53–78.
- Юдович Я.Э., Кертис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2015. 648 с.
- Bitukova V.R., Kasimov N.S. Atmospheric pollution of Russia's cities: assessment of emissions and immissions based on statistical data, *GEOFIZIKA*, 2012, vol. 29, p. 53–67.
- Zhu C., Tian H., Hao J. Global anthropogenic atmospheric emission inventory of twelve typical hazardous trace elements, 1995–2012, *Atmospheric Environment*, 2020, vol. 220, p. 117061, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117061.
- Douglas W., Dockery Sc.D. Cardiovascular Risks from Fine Particulate Air, *New England Journal of Medicine*, 2007, vol. 356, no. 5, p. 511–513.
- Henkel J., Kunde R., Gaderer M., Erdmann G. Assessment of Global Emissions, Local Emissions and Immissions of Different Heating Systems, *Sustainability*, 2009, vol. 1, p. 494–515.
- Kumar U., Jain V.K. Time series models (Grey-Markov, Grey Model with rolling mechanism and singular spectrum analysis) to forecast energy consumption in India, *Energy*, 2010, no. 35, p. 1709–1716.
- Nagvi A., Zwickl K. Fifty shades of green: Revisiting decoupling by economic sector and air pollutants, *Ecological Economics*, 2017, vol. 133, p. 111–126.
- Pacyna E.G., Pacyna J.M., Sundseth K., Munthe J., Kindbom K., Wilson S., Steenhuisen F., Maxson P. Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020, *Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44, p. 2487–2499.
- Pope C.A. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *Journal of Air & Waste Management Association*, 2006, vol. 56, p. 709–742.
- The World Atlas of Atmospheric Pollution. R.S. Sokhi (ed.), Anthem Press, 2008, 345 p.
- Tian H.Z., Zhou J.R., Zhu C.Y., Zhao D., Gao J.J., Hao J.M., He M.C., Liu K.Y., Wang K., Hua S.B. A Comprehensive global inventory of atmospheric antimony emissions from anthropogenic activities, 1995–2010, *Environmental Science & Technology*, 2014, vol. 48, p. 10 235–10 241.
- Timofeev I., Kosheleva N., Kasimov N. Health risk assessment based on the contents of potentially toxic elements in urban soils of Darkhan, Mongolia, *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 242, p. 279–289.
- Электронные ресурсы
- База данных Росприроднадзора. 2018. URL: <http://grn.gov.ru/opendata> (дата обращения 08.07.2020).
- Ежегодник загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2018 год. СПб., 2018. 234 с. URL: <http://www.meteorf.ru/product/infomaterials/ezhegodniki/> (дата обращения 06.07.2020).
- Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе (утв. Приказом Минприроды РФ №273 от 06.06.2017 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе»). URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/36322?items=1> (дата обращения 22.05.2020).
- Основные показатели окружающей среды: статистический бюллетень. М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения 10.06.2020).
- Охрана окружающей среды в России // Статистический сборник. М.: Росстат, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2019. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения: 10.02.2020).
- Показатели муниципальных образований. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). 2018. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения 10.07.2020).

Промышленность России. Росстат. 2019. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения 20.11.2019).

Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. М.: Бюро НДТ, 2017. URL: http://old.gost.ru/wps/wcm/connect/e7a9078043db0e39914fd567c7308a4d/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB_16.1.pdf?MOD=AJPERES (дата обращения 22.05.2020).

Dry Deposition. EMEP Report 1, 2003, part 8, URL: <http://emep.int/UniDoc/node11.html> (дата обращения 20.11.2019).

European Space Agency (ESA), 2015, Climate research data package (CRDP), URL: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php> (дата обращения 20.01.2020).

IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe (eds.), Published IGES, Japan, URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_0_Cover.pdf.

Поступила в редакцию 01.10.2020

После доработки 30.12.2020

Принята к публикации 21.01.2021

V.R. Bityukova¹, V.S. Dehnich², N.V. Petuhova³

IMPACT OF REGIONAL POWER PLANTS ON AIR POLLUTION IN RUSSIAN CITIES

The article discusses the main trends in the nature of atmospheric pollution by large thermal power plants. The stages of formation of the modern Russian energy system are identified. The power plants were built farther from the cities gradually shifting from large cities to medium and small cities and urban-type settlements. Regional electric power plants as a basic element of the country's energy system are much more dependent on the economic situation than CHP plants. The amount of energy produced and the fuel consumption of regional electric power plants decreases faster in crisis years. The dynamics and structure of regional electric power plants emissions depend on three main factors, i. e. capacity utilization; fuel balance structure; and modernization and creation of new treatment facilities. The share of gas-burning plants in total emissions of regional power plants is three times less than their share in the total capacity. On the other hand, coal-based electricity generation accounts for 78% of emissions that is 2.7 times more than their share in the total capacity. The modern period is characterized mostly by modernization of the first-generation power plants rather than construction of new ones. Thus the emissions are reduced, their structure is transformed and the area of pollution becomes smaller. Case study of the impact of the Kashira regional power plant on the air quality shows that atmospheric emissions reduced significantly due to modernization. The main air pollutants near the Kashira regional power plant are particulate matters and sulphur dioxide, while carbon oxide is the least contributor to air pollution.

Key words: atmospheric emissions; urban ecology, fuel power industry, industrial ecology, energy system

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-77-30004) and carried out within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University "The future of the planet and global environmental changes".

REFERENCES

Bityukova V.R., Burdenko V.O., Urezchenko V.M. Novye metody izucheniya arealov atmosfernogo zagryazneniya predpriyatii teploenergetiki (na primere Moskovskoi oblasti) [New Methods for Studying Areas of Atmospheric Pollution by Heat Power Industry Enterprises (case study of the Moscow Region)], *Problemy regional'noi ekologii*, 2003, no. 5, p. 29–39. (In Russian)

Bityukova V.R., Kasimov N.S. Atmospheric pollution of Russia's cities: assessment of emissions and immissions based on statistical data, *GEOFIZIKA*, 2012, vol. 29, p. 53–67.

Bityukova V.R., Petukhova N.V. Regional'nye i subregional'nye kontrasty promyshlennogo zagryazneniya vozdušnogo basseina Rossii v 2008–2016 gg. [Regional and subregional contrasts of industrial air pollution in Russia in 2008–2016], *Ekologiya i*

promyshlennost' Rossii, 2018, vol. 22, no. 5, p. 17–23, DOI: 10.18412/1816-0395-2018-5-17-23. (In Russian)

Demin V.F., Vasil'ev A.P., Krylov D.A. [Procedures and methods for comparative assessment of the environmental risk of different methods of electricity production], *Problemy otsenki riska zagryazneniya poverkhnostnykh i podzemnykh vod v strukture TEK*, Sbornik nauchnykh trudov OAO "Gazprom", OOO "VNIlgaz" [Problems of assessing the risk of pollution of surface and ground waters in the structure of the fuel and energy complex, Collection of scientific works of OJSC "Gazprom", Vniigaz LLC], Moscow, Nauka Publ., 2001, p. 135–145. (In Russian)

Dmitrievskii A.N., Mastepanov A.M., Krotova M.V. Energeticheskie priority i bezopasnost' Rossii (neftegazovyi

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: v.r.bityukova@geogr.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Kazakhstan Branch, Department of Ecology and Nature Management, Lecturer; e-mail: vodo.ast@gmail.com

³ ERM Eurasia Ltd, Consultant; e-mail: nv.petukhova@mail.ru

- kompleks) [Energy priorities and safety of Russia (oil and gas complex)], A.M. Mastepanova (ed.), Moscow, OOO "Gazprom ekspozitsiya", 2013, 336 p. (In Russian)
- Douglas W., Dockery Sc.D. Cardiovascular Risks from Fine Particulate Air, *New England Journal of Medicine*, 2007, vol. 356, no. 5, p. 511–513
- GOST R 50831-95. Teplo-mekhanicheskoe oborudovanie. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Boiler plants. Heat-mechanical equipment. General technical requirements], Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 1996, 24 p. (In Russian)
- GOST R 51586-2000. Ugli burye, kamennye i antratsity Kuznetskogo i Gorlovskogo bassejnov dlya jenergeticheskikh celej. Tekhnicheskie usloviya [Brow coals, hard coal and anthracites of Kuznetsk and Gorlovka basins for power supply purposes. Specification], Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 2003, 10 p. (In Russian)
- GOST R 51971-2002. Ugli Vostochnoj Sibiri dlya jenergeticheskikh celej. Tekhnicheskie usloviya [East Siberia coals for power supply and technological purposes. Specifications], Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 2003, 6 p. (In Russian)
- GOST R 51972-2002. Ugli Vostochnoj Sibiri dlya jenergotekhnologicheskikh celej. Tekhnicheskie usloviya [East Siberia coals for power supply and technological purposes. Specifications], Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 2003, 7 p. (In Russian)
- Grachev V.A. Energeticheskie tekhnologii i ustojchivoe razvitiye [Energy technology and sustainable development], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2019, vol. 23, no. 10, p. 56–60, DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-61-65.
- Henkel J., Kunde R., Gaderer M. and Erdmann G. Assessment of Global Emissions, Local Emissions and Immissions of Different Heating Systems, *Sustainability*, 2009, vol. 1, p. 494–515.
- Judovich Ja.Je., Kertis M.P. Toksichnye jelementy-primesi v iskopaemykh ugljah [Toxic trace elements in fossil coals], 2nd edition, Moscow; Berlin, Direkt-Media, 2015, 648 p. (In Russian)
- Krylov D.A., Krylov E.D., Putintseva V.P. Otsenki vybrosov v atmosferu SO₂, NO_x, tverdykh chastits i tyazhelykh metallov pri rabote TES, ispol'zuyushchikh kuznetskii i kanksko-achinskii ugol' [Estimates of emissions of SO₂, NO_x, solid particles and heavy metals into the atmosphere during the operation of thermal power plants using Kuznetsk and Kansk-Achinsk coal], *Byulleten' po atomnoi energii*, 2005, no. 4, p. 32–36. (In Russian)
- Kumar U., Jain V.K. Time series models (Grey-Markov, Grey Model with rolling mechanism and singular spectrum analysis) to forecast energy consumption in India, *Energy*, 2010, no. 35, p. 1709–1716.
- Nagvi A., Zwickl K. Fifty shades of green, Revisiting decoupling by economic sector and air pollutants, *Ecological Economics*, 2017, vol. 133, p. 111–126
- Pacyna E.G., Pacyna J.M., Sundseth K., Munthe J., Kindbom K., Wilson S., Steenhuisen F., Maxson P. Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020, *Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44, p. 2487–2499.
- Pope C.A. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *Journal of Air & Waste Management Association*, 2006, vol. 56, p. 709–742.
- Revich B.A. Melkodispersnye vzveshennye chastitsy v atmosfernom vozdukh i ikh vozdeistvie na zdorov'e zhitelei megapolisov [Finely dispersed particulate matter in the atmospheric air and the impact on residents' health in megalopolises], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2018, vol. XXIX, no. 3, p. 53–78. (In Russian)
- The World Atlas of Atmospheric Pollution. Sokhi R.S. (ed.), Anthem Press, 2008, 345 p.
- Tian H.Z., Zhou J.R., Zhu C.Y., Zhao D., Gao J.J., Hao J.M., He M.C., Liu K.Y., Wang K., Hua S.B. A Comprehensive global inventory of atmospheric antimony emissions from anthropogenic activities, 1995–2010, *Environmental Science & Technology*, 2014, vol. 48, p. 10 235–10 241.
- Timofeev I., Kosheleva N., Kasimov N. Health risk assessment based on the contents of potentially toxic elements in urban soils of Darkhan, Mongolia, *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 242, p. 279–289.
- Zhu C., Tian H., Hao J. Global anthropogenic atmospheric emission inventory of twelve typical hazardous trace elements, 1995–2012, *Atmospheric Environment*, 2020, vol. 220, p. 117061, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117061.
- Web sources
- Baza dannykh Rosprirodnadzora [Rosprirodnadzor Database], 2018, URL: <http://rpn.gov.ru/opendata> (access date 08.07.2020). (In Russian)
- Dry Deposition, EMEP Report 1 (2003), part. 8, URL: <http://emep.int/UniDoc/node11.html> (access date 20.11.2019).
- European Space Agency (ESA), 2015, Climate research data package (CRDP), URL: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php>. <https://doi.org/10.1016/j> (access date 20.01.2020)
- Ezhegodnik zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii za 2018 god, Sankt-Peterburg [Yearbook of air pollution in cities in Russia for 2018. St. Petersburg], 2018, 234 p., URL: <http://www.meteorf.ru/product/infomaterials/ezhegodniki/> (access date 06.07.2020). (In Russian)
- IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe (eds.), Published, IGES, Japan, URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_0_Cover.pdf (access date 20.01.2020).
- Metody raschetov rasseivaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfernom vozdukh (utv. Prikazom Minprirody RF no. 273 ot 06.06.2017 "Ob utverzhdenii metodov raschetov rasseivaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfernom vozdukh") [Methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in the atmospheric air (approved by Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, no. 273 dated 06.06.2017 "On approval of methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in the atmospheric air")], URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/36322?items=1> (access date 22.05.2020). (In Russian)
- Okhrana okruzhayushchei sredy v Rossii. Statisticheskii sbornik (Rosstat), 2019, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 [Environmental protection in Russia. Statistical collection (Rosstat), 2019, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018], URL: <http://www.gks.ru> (access date 10.02.2020). (In Russian)
- Osnovnye pokazateli okruzhayushchei sredy: statisticheskii byulleten', Moscow, Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki (Rosstat) [Environmental Key Indicators: Statistical Bulletin. Moscow, Federal State Statistics Service (Rosstat) 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019], URL: <http://www.gks.ru> (access date 10.06.2020). (In Russian)
- Pokazateli munitsipal'nykh obrazovaniy. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki (Rosstat), 2018 [Indicators of municipalities. Federal State Statistics Service (Rosstat), 2018], URL: <http://www.gks.ru> (access date 10.07.2020). (In Russian)
- Promyshlennost' Rossii, Rosstat, 2019 [Industry of Russia, Rosstat, 2019], URL: <http://www.gks.ru> (access date 20.11.2019). (In Russian)
- Szhiganiye topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii, Moscow, Byuro NDT, 2017 [Combustion of fuels in large installations for the purpose of energy production, Moscow, Bureau of the Best Available Technics, 2017], URL: http://old.gost.ru/wps/wcm/connect/e7a9078043db0e39914fd567c7308a4d/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB_16.1.pdf?MOD=AJPERES (access date 22.05.2020). (In Russian)

Received 01.10.2020

Revised 30.12.2020

Accepted 21.01.2021