

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА

В.А. Гинзбург^{1),2)*}, *Л.В. Кудрявцева*¹⁾ *М.С. Зеленова*¹⁾

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

*адрес для переписки: veronika.ginzburg@gmail.com

²⁾ Институт географии РАН,
119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4

Резюме. Рассмотрены удельные коэффициенты выбросов черного углерода от стационарного сжигания топлива в различных отраслях и видах экономической деятельности, основанные на национальных методиках расчета выбросов загрязняющих веществ, утвержденных в России. Проведено их сравнение со значениями, рекомендованными международной методикой инвентаризации выбросов загрязняющих веществ. Методики, утвержденные в России, предлагают коэффициенты выбросов, учитывающие метод сжигания, технические характеристики установок и зольность топлива, что позволит проводить расчеты на уровне предприятий или однородных групп источников (подход 2 уровня). Наибольшее расхождение получено в категории «Производство электричества и тепла общего пользования»: в зависимости от вида топлива, его зольности, мощности котлов и даты введения их в эксплуатацию, выбросы ТЧ_{2.5} (твердые частицы диаметром 2.5 микрон и менее) могут превышать международные в 2-20 раз. Разработана обновленная усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов черного углерода от стационарного сжигания топлива в России. Выполнены оценки выбросов твердых частиц и черного углерода на территории Российской Федерации в 2000-2018 гг. Результаты работы могут быть использованы для оценки выбросов черного углерода в России и международной отчетности в соответствии с обязательствами страны по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата и Киотского протокола к ней.

Ключевые слова. Черный углерод, сажа, твердые частицы, стационарное сжигание топлива, коэффициенты выбросов, инвентаризации выбросов, национальные методики.

Введение

Черный углерод (ЧУ) представляет собой аэрозольные компоненты или твердые частицы, состоящие преимущественно из чистого углерода, характеризующиеся воздействием на климатическую систему за счет высокого коэффициента поглощения солнечной радиации (U.S. EPA, 2012). По определению, данному в Руководстве ЕМЕП/ЕАОС¹⁾ (2013), черным углеродом обозначают широкий диапазон углеродсодержащих соединений, определяющихся по оптическим свойствам твердых частиц. Черный углерод образуется в результате сжигания ископаемого топлива и биомассы, а его результирующие характеристики, например, продолжительность жизни в атмосфере и оптические свойства, зависят от свойств топлива и условий сжигания. Черный углерод является компонентом твердых частиц и прочно связан с мельчайшими твердыми частицами диаметром 2.5 микрон и менее.

Часто в литературе, посвященной вопросам оценки выбросов и климатическим эффектам черного углерода, можно встретить использование термина «сажа» как синонима «черного углерода». Однако, это не тождественные понятия. Сажа – это твердые частицы, образующиеся при неполном сгорании органических веществ, переносимые дымом и осаждающиеся на поверхностях, соприкасающихся с ним. Сажа состоит из частичек аморфного углерода с примесью частичек золы, жидких продуктов сухой перегонки горючего вещества, влаги (Российская энциклопедия..., 2007). Размер частиц, внешний вид, теплота сгорания, отражательная способность и др. свойства сажи зависят от характеристики горючего материала и условий его горения. В первую очередь различие сажи и черного углерода с точки зрения воздействия на климат связано с различием оптических свойств аэрозолей и как следствие различной способностью к поглощению и отражению солнечного света.

В последние 10-летие возрос интерес к климатическим эффектам короткоживущих климатически активных веществ (АМАР, 2015), относительно короткое время жизни которых создает предпосылки возникновения климатических эффектов регионального уровня, например, в Арктике. К короткоживущим климатообразующим веществам относят продукты неполного сгорания с высоким содержанием ЧУ. В глобальном масштабе ЧУ является вторым или третьим по значимости климатическим форсингом (Evans et al., 2017). Он имеет положительный эффект воздействия на изменение климата посредством нескольких механизмов, которые включают прямое поглощение солнечной радиации, уменьшение альбедо снега и увеличение таяния снега, и изменение солнечной отражательной способности облаков через различные взаимодействия облаков с влажностью атмосферы.

Большинство антропогенных выбросов ЧУ происходят в северных и средних широтах с пиком выбросов около 35°N. В условиях Арктики район север-

¹⁾ Совместная программа наблюдения и оценки переноса веществ, загрязняющих атмосферный воздух, на большие расстояния в Европе (ЕМЕП). Европейское Агентство по охране окружающей среды (ЕАОС).

нее 40°N часто считается разумным приближением, т.к. совпадает с южной границей арктического фронта зимой и ранней весной. По этому определению выбросы к северу от 40°N, как предполагается, значительно влияют на Арктическую атмосферу. Выбросы ЧУ к северу от 40°N составляют 24% от глобальных антропогенных выбросов, к северу от 50°N составляют 9% и к северу от 60°N составляют менее 1% (АМАР, 2011). Хотя выбросы в Арктику в высоких широтах невелики, они имеют более высокий радиационный форсинг на единицу выбросов (мвт/м² на Гвт/год). Модельные расчеты показали, что значение радиационного форсинга в полосе широт 60-90°N в 2 раза выше, чем в полосе 50-60°N и в 4 раза выше, чем в области 40-50°N (АМАР, 2011.). Поэтому точные расчеты выбросов ЧУ имеют решающее значение для понимания воздействия черного углерода как климатического форсинга.

В данной работе рассмотрены методические подходы к оценке выбросов в атмосферу черного углерода при стационарном сжигании ископаемого топлива, приемлемые для использования в российских условиях. Для этого проведено сопоставление методики, применяющейся в национальных кадастрах Европейских стран о выбросах загрязняющих веществ, подготавливаемых в рамках обязательств по Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния, и национальных методик расчета выбросов загрязняющих веществ, утвержденных в России для расчета, нормирования и контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (Перечень методик..., 2018). В результате проведенного анализа разработана обновленная усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов черного углерода от стационарного сжигания топлива в России, которая позволяет выделить долю черного углерода из сажи и твердых частиц другого размера. Выполнены оценки выбросов черного углерода от стационарных источников на территории Российской Федерации в 2000-2017 гг.

Методические подходы

Выбросы сажи при сжигании топлива на стационарных установках в значительной мере зависят не только от типа используемого топлива, но и от метода сжигания и технических характеристик установки. Для оценки выбросов от стационарных источников существует ряд национальных методик, утвержденных Перечнем методик (Перечень методик..., 2018) и рекомендованных для оценки выбросов загрязняющих веществ. Кроме того, подходы к оценке выбросов сажи от стационарного сжигания в различных отраслях и видах деятельности, основанные на коэффициентах выбросов на единицу сожженного топлива, приведены в международных методиках таких, например, как Руководство ЕМЕП/ЕАОС по инвентаризации выбросов (ЕМЕП/ЕАОС, 2009, 2013, 2016).

Те же самые технологии контроля выбросов, которые ограничивают выброс твердых частиц и сажи, также будут уменьшать выброс черного углерода. В связи с ограниченностью данных измерений, предполагается, что выброс черного углерода можно уменьшить пропорционально выбросу твер-

дых частиц, в частности, выбросу твердых частиц диаметром не более 2.5 мкм ($\text{TЧ}_{2.5}$). Поэтому в большинстве разработанных в данный момент методик проведения инвентаризации выбросов черного углерода коэффициенты выбросов ЧУ выражаются в виде процентов от выбросов $\text{TЧ}_{2.5}$.

Методика оценки выбросов черного углерода от источников стационарного сжигания, по аналогии с международно-признанными методологиями инвентаризации выбросов парниковых газов МГЭИК²⁾ (2006) и инвентаризации выбросов загрязняющих веществ ЕМЕП/ЕАОС (2009, 2013, 2016), основана на применении удельного коэффициента выброса на единицу сжигаемого топлива. Для расчета используется базовое уравнение:

$$E_{\text{ч.у.}} = AD_{\text{топливо}} EF_{\text{сажа}} \eta_{\text{ч.у.}} \times 10^{-3}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ч.у.}}$ – выбросы черного углерода (т/год); $AD_{\text{топливо}}$ – количество топлива каждого вида, сжигаемого на стационарной установке (т/год); $EF_{\text{сажа}}$ – коэффициент выбросов твердых частиц $\text{TЧ}_{2.5}$ при сжигании 1 тонны топлива (кг т^{-1}); $\eta_{\text{ч.у.}}$ – доля черного углерода в общей массе выбрасываемых частиц $\text{TЧ}_{2.5}$.

На первом этапе подготовки системы расчетного мониторинга выбросов черного углерода и для проведения предварительных оценок выбросов возможно использование обобщенных коэффициентов выбросов черного углерода по категориям источников. Такие оценки могут базироваться на данных о деятельности (сжигании топлива) по категориям источников. В качестве исходных данных для проведения оценки выбросов черного углерода при сжигании ископаемого топлива в России выбрана база данных, используемая для разработки Национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом (НДК, 2019). Данная база ведется Федеральным государственным бюджетным учреждением «Институтом глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (ИГКЭ) с 1990 года и включает в себя наиболее полную информацию о количестве ископаемого топлива, сжигаемого на территории России с разбиением по категориям источников. В основном данные о сжигании топлива основаны на информации Росстата, предоставляемой в виде ежегодного топливно-энергетического баланса (ТЭБ), который в дальнейшем корректируется в соответствии с классификацией категорий источников, отражающей структуру кадастра выбросов, и дополнительными данными о деятельности, полученными по отдельным категориям источников.

В зависимости от выбранных для расчета удельных коэффициентов выбросов при сжигании топлива по категориям источников, по аналогии с методикой МГЭИК и ЕМЕП/ЕАОС, будем различать два подхода:

²⁾ Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), англ. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC

- *подход первого уровня*, основанный на данных о сжигании топлива по категориям источников, используемых в кадастре выбросов парниковых газов в Российской Федерации за 2013 год (НДК, 2019), и коэффициентах выбросов $ТЧ_{2.5}$ и долях черного углерода, рекомендуемых в руководстве ЕМЕП/ЕАОС (2013).

- *подход второго уровня*, основанный на использовании тех же данных о деятельности и национальных коэффициентов выбросов сажи, рекомендуемых в национальных методиках для оценки выбросов загрязняющих веществ и выделению в них доли черного углерода.

Оценка выбросов черного углерода по подходу первого уровня

Данные о деятельности (НДК, 2019) и коэффициенты выбросов, рекомендуемые в методологии ЕМЕП (ЕМЕП/ЕАОС 2009, 2013, 2016) представлены по следующим категориям: энергетическая промышленность, обрабатывающая промышленность, строительство, малое сжигание (коммунальное хозяйство, сельское хозяйство, жилой сектор и др.), факельное сжигание.

По данным Руководства ЕМЕП/ЕАОС ключевыми источниками выбросов $ТЧ_{2.5}$ при стационарном сжигании топлива в энергетических отраслях могут быть котлы и печи, газовые турбины, дизельные установки, нефтеперерабатывающие установки и доменные печи.

Структуры категорий источников выбросов, используемые при подготовке кадастра выбросов парниковых газов и рекомендуемые в руководствах ЕМЕП/ЕАОС, совпадают, а классификация типов топлива не полностью идентична. В табл. 1 приведена классификация типов топлива, используемая при проведении расчетов выбросов черного углерода.

Таблица 1. Классификация типов топлива, используемая в национальном кадастре выбросов парниковых газов, руководстве по инвентаризации выбросов ЕМЕП/ЕАОС и в проведенном расчете выбросов черного углерода

Национальный доклад о кадастре	Руководство ЕМЕП/ЕАОС	Расчет выбросов черного углерода по 1 и 2 уровням
Твердое топливо (Антрацит, коксующийся уголь, каменный уголь, бурый уголь, горючий сланец, угольные брикеты, газ горючий искусственный коксовый, газ горючий искусственный доменный, кокс металлургический, смола каменноугольная).	Каменный уголь (Коксующийся уголь, другой битуминозный уголь, полубитуминозный уголь, кокс, угольные брикеты)	Уголь и кокс (Антрацит, коксующийся уголь, каменный уголь, кокс металлургический)
	Бурый уголь (Лигнит, битумный сланец, торфяные брикеты, торф)	Другие твердые топлива (Бурый уголь, горючие сланцы, угольные брикеты, смола каменноугольная)

Газообразное топливо (Газ природный естественный)	Газообразные типы топлива (Природный газ, жидкости из природного газа, сжиженный нефтяной газ, газ нефтепереработки, заводской газ, коксовый газ, доменный газ)	Газообразные топлива (Природный газ, сжиженный нефтяной газ, газ нефтеперерабатывающих предприятий, газ горючий искусственный коксовый, газ горючий искусственный доменный)
Жидкие топлива (Нефть сырая, бензин, керосин, дизельное топливо, мазут, сжиженный нефтяной газ, другие моторные топлива, газ нефтеперерабатывающих заводов, нефтяной кокс, другие нефтепродукты)	Тяжелое дизельное топливо (Остаточный нефтепродукт, сырье нефтепереработки, нефтяной кокс, водно-битумная эмульсия, битум)	Тяжелые нефтепродукты (Сырая нефть, смазочные материалы, нефтяной кокс, мазут, дизельное топливо, другие нефтепродукты)
	Светлые нефтепродукты (дизельное топливо, керосин, нефть, сланцевое масло)	Светлые нефтепродукты (Бензин, керосин) – не включены в расчет, т.к. используются на мобильных источниках
Биомасса (Древесина топливная, древесный уголь, отходы биогенные)	Биомасса (Древесина, древесный уголь, отходы овощей (с/х))	Биомасса (Древесина топливная, древесный уголь, отходы биогенные)

Коэффициенты выбросов твердых частиц и доли в них черного углерода получены из доступных литературных данных и обобщены в руководствах ЕМЕП/ЕАОС по ключевым топливным группам. Регулярно проводится пересмотр коэффициентов выбросов, в том числе и черного углерода, данные по которому приводятся в руководствах 2009, 2013, 2016 годов (ЕМЕП/ЕАОС, 2009, 2013, 2016).

Оценка выбросов черного углерода по подходу второго уровня

Национальные методики расчета выбросов загрязняющих веществ не дифференцируют черный углерод в чистом виде, а приводят удельные коэффициенты для оценки выбросов сажи и твердых частиц. В Руководстве по инвентаризации выбросов (ЕМЕП/ЕАОС, 2013) приведены коэффициенты выбросов (К) твердых частиц (ТЧ) размером 10 мкм и 2.5 мкм для различных видов стационарного сжигания топлива. Поскольку выбросы сажи, определяемые российскими методиками, содержат частицы всех размеров, выделение из них дол и ТЧ_{2.5} проводилось по формуле:

$$D_{TЧ2.5} = K_{TЧ2.5} / (K_{TЧ10} + K_{TЧ2.5}), \quad (2)$$

где $D_{TЧ2.5}$ – доля частиц размером 2.5 мкм в общем объеме твердых частиц, выброшенных при стационарном сжигании топлива, $K_{TЧ10}$ – коэффициент выбросов твердых частиц размером 10 мкм для соответствующей кате-

гории выбросов, принятые по методике ЕМЕП/ЕАОС, $K_{TЧ_{2.5}}$ – коэффициент выбросов твердых частиц размером 2.5 мкм для соответствующей категории выбросов, принятые по методике ЕМЕП/ЕАОС.

Оценки по подходу второго уровня проведены для следующих категорий источников: производство электричества и тепла общего пользования, производство твердого топлива и другие энергетические отрасли производства, нефтепереработка, сжигание топлива в котлах, бытовое сжигание, сжигание попутного нефтяного газа на факелах. Необходимо отметить, что в данной статье проводится оценка выбросов, образующихся только в процессе сжигания топлива, выбросы при пылении, пересыпке и других технологических процессах, связанные с образованием пылевых выбросов, не рассматриваются.

Соотношение категорий выбросов, принятых в руководствах МГЭИК и ЕМЕП/ЕАОС и в российских национальных методиках, приведено в табл. 2. Все действующие и используемые в расчетах методики обобщены в Справочнике по удельным показателям выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (Справочник..., 2001).

Таблица 2. Соответствие категорий выбросов, принятых в руководствах МГЭИК (2006) и ЕМЕП/ЕАОС (2013), российским национальным методикам

МГЭИК ЕМЕП/ЕАОС	Российские методики
1A1a Производство электроэнергии и тепла (Энергетическая промышленность)	Твердое топливо (ГОСТ Р 50831-95), Жидкое топливо (Методика расчета..., 2001), Газообразное топливо (Методическое пособие..., 2005), Биомасса (Методические указания ..., 1985)
1A2 – Производственные отрасли и строительство	Твердое топливо (Методика определения..., 1999), Жидкое топливо (Методика расчета..., 2001), Биомасса (Методические указания..., 1989)
1A4a – Коммерческий сектор	Твердое топливо (Методика определения..., 1999), Биомасса (Методические указания..., 1989)
1A4b – Жилой сектор (Бытовое сжигание)	Методические указания ..., 1985 Сборник методик..., 1986 Методика определения ..., 1997
1A4c – сельское хозяйство, лесное хозяйство	Методические указания ..., 1985, Сборник методик..., 1986, Методика определения ..., 1997
1A5 – другие отрасли	Жидкое топливо (Методика определения..., 1999), Жидкое топливо (Методика расчета..., 2001), Биомасса (Методические указания..., 1986)

Определение доли черного углерода в выбросах $TЧ_{2.5}$ для различных категорий источников, а также выделение коэффициентов выбросов $TЧ_{2.5}$ (отвечающих за выход черного углерода) из суммарных коэффициентов для твердых частиц проводилось на основе пропорций, рекомендованных ЕМЕП.

Разработка национальных коэффициентов для методики 2 уровня

Сравнительная оценка удельных коэффициентов выбросов от стационарных источников сжигания топлива, рекомендованных международными и российскими методиками

В рамках данной работы были проанализированы удельные коэффициенты выбросов твердых частиц, рекомендованные в европейских и российских методиках для различных категорий источников. Российские методики предназначены для использования на уровне предприятий, т.е. в соответствии с методиками МГЭИК и ЕМЕП/ЕАОС могут использоваться при расчетах по подходу третьего уровня. Однако, для применения подхода третьего уровня необходимы данные о деятельности на уровне предприятий, поэтому проведение расчетов такой детализации в данный момент не представляется возможным.

Выбросы твердых веществ, в том числе и черного углерода, в значительной мере зависят от применяемой технологии сжигания и зольности топлива, поэтому коэффициенты выбросов твердых частиц, приведенные в российских методиках, отличаются значительной вариабельностью. Наибольший разброс удельных значений выбросов твердых частиц характерен для твердого топлива. В зависимости от мощности сжигаемой установки и зольности топлива, значение коэффициента выбросов твердых частиц может отличаться более чем в 10 раз. Прямое их сравнение с коэффициентами, используемыми по умолчанию для расчетов первого уровня в международных методиках, не является корректным, поэтому в табл. 3 приведен диапазон коэффициентов выбросов твердых частиц, принятых в российских методиках, для отдельных категорий стационарного сжигания топлива.

В категории «Производство электричества и тепла общего пользования» методика ЕМЕП предлагает для твердого топлива средний коэффициент выбросов $ТЧ_{2,5}$ равный 3.4 г/ГДж (с диапазоном значений от 0.9 до 90 г/ГДж). Согласно российскому ГОСТу (ГОСТ Р 50831-95) выбросы твердых частиц зависят от зольности топлива, мощности котлов и даты введения их в эксплуатацию. Простое осреднение предложенных в российских методиках значений удельных выбросов дает значение коэффициента для $ТЧ_{2,5}$ равное 32.6 г/ГДж, что в 10 раз превышает средний коэффициент ЕМЕП (см. табл. 3). Наиболее близкими (4.3 г/ГДж) являются выбросы котельных установок, вводимых на ТЭС с 01.01.2000 г. при мощности котлов более 300 МВт и малой приведенной зольности ($A_{пр} = A^r/Q^r$ менее 0.6% кг/МДж. Здесь A^r - зольность топлива в %, Q^r - теплота сгорания топлива, МДж/кг).

Таблица 3. Сравнительная характеристика удельных коэффициентов выбросов твердых частиц для европейских и российских методик.

НАЦИОНАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ			ЕМЕР/ЕАОС (2013)	
Коэффициенты выбросов	Твердые вещества г/ГДж	ТЧ _{2,5} г/ГДж	Среднее значение и 95% доверительный интервал	
			ТЧ _{2,5} (г/ГДж)	ЧУ (% от ТЧ _{2,5})
Производство электричества и тепла общего пользования				
Твердое топливо всех видов (ГОСТ Р 50831-95) при разной зольности			Каменный уголь	
Для установок, вводимых до 31.12. 2000 г.			3.4 (0.9-9.0)	2.2 (0.27-8.08)
до 299 МВт	60-200	20-61		
более 300 МВт	40-160	13-51		
Для установок, вводимых с 01.01.2000 г.			3.4 (0.9-9.0)	2.2 (0.27-8.08)
до 299 МВт	60-100	20-31		
более 300 МВт	20-60	4.3 - 20.0		
Дизельгенераторы, в зависимости от мощности и быстроходности (Методика расчета..., 2001)			Тяжелые нефтепродукты	
До капремонта (пр-во РФ)	97-196	42-84	19.3 (0.9-9.0)	5.6 (0.22-8.69)
После капремонта (пр-во РФ)	125-252	54-109		
Зарубежного производства	28-56	12-24		
с применением природоохранных технологий	60-80% очистки	8.4-16.8		
Газовые генераторы (Методическое пособие..., 2005)			Газообразное топливо	
Без разделения	4.9-9.8	2.1-4.2	0.89 (0.445-1.34)	2.5 (1-6.3)
Дрова (Методические указания..., 1985)				
Без разделения	300	129	133 (66-266)	3.3 (1.6-6.6)
Сжигание в котлах малой производительности (Методика определения..., 1999)			Коммерческое сжигание	
Каменный и бурый уголь	111-278	71-178	108 (60-220)	6.4 (2-26)
Жидкое топливо	37	19	20 (12-28)	56 (33-78)
Газообразное топливо			0.78 (0.47-1.09)	4.0 (2.1-7)
Биомасса	190-380	95-190	140 (70-279)	28 (11-39)
Бытовое сжигание (Методические указания..., 1985), (Сборник..., 1986)			Бытовое сжигание	
Каменный и бурый уголь	448-1776	224-888	398 (72-480)	6.4 (2-26)
Жидкое топливо	5-25	2.5-12.5	1.9 (1.1-2.6)	8.5 (4.8-17)
Газообразное топливо			1.2	5.4
Биомасса	1400	700	740 (370-1480)	10 (2-20)

Для жидкого топлива руководство ЕМЕП рекомендует средний коэффициент выброса $\text{ТЧ}_{2.5}$ равный 19.3 г/ГДж. Российская методика выбросов загрязняющих веществ от стационарных дизельных установок (Методика расчета..., 2001) различает 3 вида дизельных установок: до капитального ремонта, после капитального ремонта и дизельгенераторы зарубежного производства. В каждом виде выбросы определяются их мощностью и быстроходностью. Для всех российских установок выбросы $\text{ТЧ}_{2.5}$ превышают европейские от 2 до 5 раз, а простое усреднение значений дает коэффициент в 2,3 раза превышающий значение, предлагаемое по умолчанию в методике ЕМЕП/ЕАОС. Минимальное значение выбросов от дизельгенераторов российского производства 42 г/ГДж дают мощные двигатели (736-7360 кВт) с низкой быстроходностью (500-1000 мин⁻¹). Дизельные установки зарубежного производства соответствуют уровню международных норм (12-24 г/ГДж). Применение природоохранных технологий (жидкостные и каталитические нейтрализаторы, сажевые фильтры, «экологические чистые» виды топлив и т.п.) позволяет снизить выбросы на 30-95 %, до 10 г/ГДж.

Для газообразного топлива выбросы $\text{ТЧ}_{2.5}$ оцениваются в 2.1-4.2 г/ГДж (Методическое пособие..., 2005), что превышает данные ЕМЕП (0.89 г/ГДж) в 2-4 раза.

Сжигание дров в котлах тепловых электростанций приводит к выбросам $\text{ТЧ}_{2.5}$ равным 129 г/ГДж (Методические указания..., 1985; Сборник методик..., 1986), что почти совпадает с рекомендациями ЕМЕП (133 г/ГДж).

Для категорий 1A1b – Переработка нефти и 1A1c – Производство твердых топлив руководство ЕМЕП/ЕАОС предлагает использовать те же значения коэффициентов выбросов, что и для категории 1A1a – Централизованное производство тепловой и электроэнергии, за исключением коэффициента выброса твердых частиц и черного углерода от сжигания газа нефтеперерабатывающих предприятий и коэффициента выброса от угля на предприятиях по производству кокса. В удельный коэффициент выброса от обращения с углем при производстве кокса включены так же выбросы от пыления. Для его использования необходимо учитывать полный объем угля, используемого на предприятии и для сжигания, и для технологического процесса, для чего требуется пересмотр базы исходных данных, используемых для расчета. Поэтому в данной работе учтены только выбросы от сжигания угля на предприятиях по производству кокса.

Под **промышленным и коммерческим сжиганием** ЕМЕП подразумевает отопление промышленных объектов и учреждений при помощи котлов, мощность которых меньше 50 кВт, и рекомендует в качестве удельных выбросов 108 г/ГДж $\text{ТЧ}_{2.5}$ для каменного и бурого угля. Согласно российской методике (Методика определения..., 1999) выбросы твердых частиц от угольного топлива могут достигать 2-5 г/кг топлива или 111-278 г/ГДж в зависимости от его зольности при среднем значении 195 г/ГДж. В пересчете на $\text{ТЧ}_{2.5}$ выбросы составляют 71-178 г/ГДж со средним значением 117 г/ГДж что не превышает европейские нормы.

Выбросы $\text{ТЧ}_{2.5}$ от жидкого топлива очень близки: 20 г/ГДж по данным ЕМЕП и 1.5 г/кг = 37 г/ГДж для твердых частиц или 19 г/ГДж для $\text{ТЧ}_{2.5}$ согласно российской методике.

Выбросы $\text{ТЧ}_{2.5}$ при коммерческом сжигании биомассы по рекомендации ЕМЕП составляют 140 г/ГДж. Согласно методике по термической переработке твердых бытовых отходов (Методические указания..., 1989) сжигание дров в инсинераторе дает выброс твердых частиц 1.9-3.8 г/кг или 190-380 г/ГДж в зависимости от характеристик топок при среднем значении 285 г/ГДж, что в пересчете на $\text{ТЧ}_{2.5}$ составляет 142.5 г/ГДж (с диапазоном значений от 95 до 190 г/ГДж). Таким образом, европейские нормы при коммерческом сжигании соответствуют средним значениям национальных методик.

Бытовое сжигание по классификации ЕМЕП - это отопление жилых помещений, приготовление пищи с использованием каминов, печей, плит и малых котлов.

В Российской Федерации нет методик для таких источников сжигания, и НИИ Атмосферы (Методическое пособие..., 2005) рекомендует для данных топливосжигательных устройств (горны, печи, отдельные горелки и т.п.) расчет выбросов проводить по методике для сжигания топлива в котлах производительностью до 30 т/час (Методические указания..., 1985). Согласно этой методике, выбросы твердых частиц от сжигания каменного и бурого угля в зависимости от зольности топлива составляют 10-40 кг/т для слоевых топок бытовых теплоагрегатов и могут достигать 56-222 кг/т для других топок. Это составляет для выбросов твердых частиц 448-1776 г/ГДж для твердого топлива при среднем значении 1112 г/ГДж.

Выбросы $\text{ТЧ}_{2.5}$ от сжигания жидкого топлива составляют 1.9 г/ГДж по данным ЕМЕП. Рекомендованная НИИ Атмосферы Методика дает для бытовых теплогенераторов и паровых и водогрейных котлов 0.2-1.0 кг/т = 5-25 г/ГДж (при среднем значении 15 г/ГДж) для твердых частиц или 7.5 г/ГДж (2.5-12.5) для $\text{ТЧ}_{2.5}$ в зависимости от вида жидкого топлива.

Таким образом, категория «Бытовое сжигание» обладает максимальной неопределенностью в оценках коэффициентов выбросов твердых частиц. Однако, европейские нормы дают диапазон выбросов, сопоставимый с данными, полученными при расчете по российским методикам.

При сжигании биомассы ЕМЕП рекомендует выбросы $\text{ТЧ}_{2.5}$ 740 г/ГДж. Такие выбросы можно получить только при свободном (неорганизованном) горении дров. Согласно методике (Методика..., 1997) при таком горении выделяется 14 кг/т или 1400 г/ГДж сажи, что в пересчете на $\text{ТЧ}_{2.5}$ составляет 700 г/ГДж и соответствует европейским нормам.

Подходы к уменьшению неопределенности оценки выбросов черного углерода по подходу второго уровня

Наибольшей неопределенностью, как видно из табл. 3, обладают коэффициенты выбросов твердых частиц и, соответственно, черного углерода от сжигания углей. Это связано с большим разнообразием процессов горения в теплоэнергетике, промышленности и других секторах, а также с зольностью

углей разных угольных бассейнов и типов. На данном этапе работы собрать информацию о технологиях сжигания не представляется возможным, поэтому в статье была предпринята попытка уменьшения неопределенности за счет определения средней удельной зольности углей, используемых в качестве топлива в отдельных категориях.

В разделе **Производство электричества и тепла общего пользования** российские методики дают различные коэффициенты выброса в зависимости от мощности котлов (до 300 Мвт и более), времени ввода котельных установок (до 2000 года и позже) и трех диапазонов приведенной зольности углей: $A < 0.6\%$, $0.6\% < A < 2.5\%$ и $A > 2.5\%$. Диапазон изменения коэффициентов выбросов твердых частиц составляет 20-200 г/ГДж при среднем значении 110 г/ГДж. Для уменьшения неопределенности в выбросах выполнена оценка средневзвешенной приведенной зольности углей РФ. По данным Росстата для различных видов производств используются угли различных месторождений, обладающих разной зольностью. При стационарном сжигании больше всего используется угля из Канско-Ачинского (94%), Кузнецкого (51%), Читинского (до 41%) и Экибастузского (до 18%) бассейнов. Средняя зольность их составляет соответственно 6.2%, 22%, 9.6% и 32.6%. По данным Росстата была рассчитана средневзвешенная (с учетом доли в общей массе) зольность углей, применяемых в качестве топлива на различных производствах, которая использовалась при расчете выбросов черного углерода.

Для расчета выбросов твердых частиц в категории источников "Производство электричества и тепла общего пользования" использовалась приведенная зольность $A_{пр} = A^f / Q^f$, % кг/МДж, где A^f – зольность топлива в %, Q^f – теплота сгорания топлива, МДж/кг. Значение приведенной зольности для углей различных месторождений и средневзвешенной зольности в этой категории составило 1.3, что позволило оценивать коэффициент выбросов твердых частиц по диапазону 0.6-2.5 (ГОСТ Р 50831-95). В предположении линейной зависимости выбросов от приведенной зольности находим для $A=1.3$ коэффициент 112 г/ГДж для мощности котлов менее 300 Мвт, 84 г/ГДж для более 300 Мвт и, соответственно, 75 г/ГДж и 38 г/ГДж для котельных установок вводимых с 1 января 2000г. Таким образом, диапазон неопределенности уменьшился до 38-112 г/ГДж при среднем значении 75 г/ГДж.

При сжигании жидкого топлива в дизельгенераторах разброс в коэффициентах выбросов сажи очень велик и составляет 28-252 г/ГДж в зависимости от мощности, быстроходности проведения капитального ремонта и страны-изготовителя. Кроме того в "Методике..." расчета выбросов от стационарных дизельных генераторов (2001) заложена возможность учета применения природоохранных технологий и соответственного уменьшения удельного выброса на 60-80%. Посчитанный с учетом возможного внедрения природоохранных технологий средний коэффициент выбросов черного углерода при сжигании жидкого топлива в дизельгенераторах составляет 2.45 г/ГДж. В данной работе, в связи с отсутствием информации о применении природоохранных технологий, принят наиболее консервативных подход – для расчета

использовано среднее удельное значение выброса без учета применения природоохранных технологий, равный для черного углерода 3.39 г/ГДж.

Удельные значения выбросов черного углерода, предлагаемые для использования в расчетах второго уровня с учетом характеристик топлива и технологий сжигания, применяемых в России, приведены в табл. 4. Неопределенность коэффициентов рассчитана исходя из разброса значений удельных выбросов твердых частиц, так как соотношение твердых частиц разных размеров и доля черного углерода принималась одинаковой в расчетах и 1-го и 2-го уровня.

Таблица 4. Национальные удельные коэффициенты выбросов черного углерода для России для категорий стационарного сжигания топлива

Категория источников/ топливо	Предлагаемые национальные коэффициенты, г/ГДж				Коэффициенты, рассчитанные по методике ЕМЕП/ЕАОС, г/ГДж
	Среднее значение	Нижнее значение	Верхнее значение	Диапазон значений, +/- %	Среднее значение
Производство электричества и тепла общего пользования					
Жидкое топливо	3.39	0.68	6.12	80	1.08
Твердое топливо	0.51	0.26	0.75	48	0.075
Газ	0.08	0.05	0.11	38	0.02
Биомасса	4.26			0	4.39
Промышленное и коммерческое сжигание					
Жидкое топливо	10.64	-	-		11.2
Твердое топливо	7.97	4.47	11.36	43	6.91
Газ	0.08	0.05	0.11	38	0.03
Биомасса	39.9	26.6	53.2	33	39.2
Бытовое сжигание					
Жидкое топливо	0.64	0.21	1.06	66	0.16
Твердое топливо	35.58	14.34	56.83	60	25.47
Газ	0.08	0.05	0.11	38	0.065
Биомасса	70	-	-		74

В целом данные об удельных выбросах черного углерода, полученные для источников стационарного сжигания топлива в данной работе, имеют меньший разброс по сравнению с неопределенностью значений в обзоре (Evans et al., 2017). Связано это с тем, что мы учитывали неопределенности только в оценках коэффициентов выбросов в российских методиках, но не рассматривали неопределенности в оценках частиц размером 2.5 мкм и процентов ЧУ от них по данным ЕМЕП.

По сравнению с неопределенностью коэффициентов, приведенных в руководствах ЕМЕП/ЕАОС, у предлагаемых национальных коэффициентов значительно сокращена неопределенность удельных выбросов на предприятиях энергетического сектора от сжигания твердого топлива (благодаря нормированию на среднюю зольность топлива, используемого в России) и жидкого топлива (благодаря тому, что исходные значения коэффициентов выбросов твердых веществ в национальных методиках обладают меньшей неопределенностью). Так же меньшей неопределенностью обладают предлагаемые национальные коэффициенты выбросов при сжигании природного газа на предприятиях энергетического сектора, твердого топлива и биомассы в промышленности и коммунальном секторе. Незначительное увеличение неопределенности оценок выбросов черного углерода при использовании национальных коэффициентов выбросов отмечается для сжигания жидкого топлива населением.

Средние значения удельных выбросов, полученных по данным национальных методик, в большинстве случаев выше, чем коэффициенты, предлагаемые по умолчанию по руководствам ЕМЕП/ЕАОС. Наиболее заметно увеличение удельных коэффициентов выбросов при сжигании твердого топлива в энергетической промышленности (в 6.8 раз по сравнению с европейским коэффициентом), газообразного топлива в энергетической промышленности (в 4 раза), жидкого топлива при бытовом сжигании (в 4 раза) и жидкого топлива в энергетической промышленности (в 3.1 раза). Хорошо совпадают значения удельных показателей выбросов при сжигании биомассы и твердого топлива при бытовом и промышленном сжигании и газа при бытовом сжигании.

В целом, внедрение коэффициентов, полученных по национальным методикам, позволяет сократить неопределенность оценок выбросов черного углерода при сжигании топлива на стационарных источниках, но дает более высокие значения удельных выбросов.

Результаты оценки выбросов, сравнение методик и дискуссия

Результаты оценки выбросов твердых частиц и черного углерода от стационарного сжигания топлива на территории Российской Федерации

Сравнение подходов для оценки выбросов твердых частиц, частиц диаметром не более 2.5 мкм и черного углерода от стационарного сжигания топлива в России проведено для 2013 года (табл. 5).

Для верификации оценок выбросов твердых частиц от источников стационарного сжигания топлива на территории Российской Федерации были проанализированы сведения Росстата об использовании топливно-энергетических ресурсов и данные о выбросах твердых частиц по видам экономической деятельности за 2013 год (Охрана окружающей среды..., 2014).

Росстат использует следующую структуру категорий стационарных источников:

- производство и распределение электроэнергии, газа и воды;

- добыча топливно-энергетических полезных ископаемых;
- обрабатывающие производства;
- сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство;
- рыболовство и рыбоводство;
- предоставление прочих коммунальных, социальных и персональных услуг.

Раздела «бытовое сжигание» в российской классификации нет.

Необходимо учитывать, что статистическую отчетность представляют только крупные предприятия и в нее не входят данные о выбросах от сжигания топлива населением и на других, не учитываемых ранее, источниках.

Сравнение полученных результатов с реальными выбросами твердых веществ от крупных стационарных источников энергетической отрасли в 2013 г. (Охрана..., 2014) показало в целом несколько меньшие значения расчетных выбросов. Это можно объяснить тем, что реальные выбросы определяются не только стационарным сжиганием, но и другими источниками – пересыпкой углей, пылью из действующих терриконов и недействующих отвалов, открытых площадей в угольных разрезах и различных производствах. В оценках выбросов черного углерода этот факт не имеет большого значения, т.к. черный углерод образовывается только в процессе сгорания топлива. Кроме того, еще одним фактором расхождения расчетных данных с данными статистики предприятий может быть особенность формирования базы данных о деятельности для кадастра выбросов парниковых газов, используемой для расчетов в данной работе. Согласно методике МГЭИК (2006) сжигание топлива для производства тепло- и электро- энергии для собственных нужд предприятия относится к обрабатывающим производствам, а в статистике Росстата они могут учитываться как централизованные производители тепла и энергии, т.к. многие из производственных ТЭЦ поставляют энергию в сети общего пользования.

Тем не менее, суммарные значения выбросов твердых веществ, приведенные в статистике Росстата за 2013 год, и, оцененные с применением методики 2 уровня, показывают хорошую сходимость.

Сравнение данных о выбросах частиц диаметром не более 2.5 мкм проведено с использованием базы данных выбросов для глобальных атмосферных исследований (Emissions database for global atmospheric researches - EDGAR https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=50_AP#), данными кадастра выбросов загрязняющих веществ, представленными Россией в соответствии с Конвенцией ЕЭК ООН³⁾ о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (ИДК, 2019), и оценок, проведенных по методике уровня 1 (с применением коэффициентов ЕМЕП/ЕАОС) и уровня 2 (с применением национальных коэффициентов, предложенных в табл. 4).

³⁾ Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН)

Таблица 5. Сравнительные оценки выбросов твердых частиц, ТЧ_{2,5} и черного углерода при стационарном сжигании топлива в Российской Федерации в 2013 г., полученные по разным методикам

Категория источника	Твердые частицы, всего, тыс.т		Твердые частицы 2.5 мкм, тыс.т				Черный углерод, тыс.т			
	Расчет по методике 2 уровня	Данные отчетности предприятий (Росстат)	Расчет по методике 2 уровня	Расчет по методике 2 уровня	EDGAR	Расчет по методике 2 уровня	Расчет по методике 2 уровня	Расчет по методике 2 уровня	EDGAR	Оценки (Evans et al., 2017)
Производство электроэнергии и тепловой энергии	706.7	928.7	32.90	129.56	62.18	1.16	4.15	3.67	16.4	12-27
						0.09-24.5	1.7-6.6			
Обрабатывающие производства	959.2	539.9	43.55	48.61	25.30	6.81	7.00	2.40	5.1	1-51
						1.97-27.15	5.8-8.4			
Коммерческий сектор	2.3	4.6	1.36	1.49		0.31	0.31		5.6	
						0.1-0.97	0.28-0.36			
Бытовое сжигание	168.5	-	61.98	50.78	77.37	5.03	5.76	7.08	14.1	
						0.4-21.4	4.0-7.6			
Сельское хозяйство, рыболовство	26.4	28.8	1.51	1.59		0.50	0.49		9	
						0.14-1.24	0.41-0.59			2-22
Другие источники, не учтенные ранее	99.2	-	16.66	16.93	0.58	5.59	5.48	0.23	-	
						1.68-13.95	4.8-6.35			
Всего	1962.3	1473.2	157.96	248.95	165.43	19.40	23.20	13.38	50.2	

Суммарные выбросы $\text{ТЧ}_{2,5}$, рассчитанные с применением методики 1 уровня, показывают хорошее совпадение со значениями в кадастре выбросов загрязняющих веществ, представленном Россией в соответствии с Конвенцией ЕЭК ООН. При этом существенное отличие наблюдается в распределении выбросов по категориям источников. Значительнее всего расходится оценка вклада бытового сжигания в суммарные выбросы $\text{ТЧ}_{2,5}$, который для 2013 года в расчетах по методике 2 уровня с использованием базы данных ИГКЭ составил 39%, а по данным кадастра РФ всего 4% (ИДК, 2019). При этом по данным EDGAR вклад малого сжигания (бытовое, коммерческое и сельскохозяйственное) в России в этом же году составил 47%. В кадастре выбросов загрязняющих веществ (ИДК, 2019) большинство данных о выбросах $\text{ТЧ}_{2,5}$ рассчитаны по данным государственной статистики, т.е. по отчетности предприятий, а для коммерческого и бытового сжигания данные о выбросах представлены на основании расчетной оценки. Возможно, неоднородность данных по разным категориям источников и приводит к занижению вклада бытового сжигания в ИДК (2019).

Сравнение данных о выбросах черного углерода проведено по оценкам, полученным с применением методики 1 и 2 уровней, по данным базы EDGAR и по материалам работы Эванс и др. (Evans et al., 2017). Последний источник представляет результаты критического обзора ряда исследований, посвященных оценке выбросов черного углерода в России, проведенного группой американских авторов. Примечательно, что большинство исследований, включенных в обзор, так же проведено иностранными авторами, что говорит об очевидной нехватке отечественных исследований, посвященных оценке выбросов черного углерода в России.

Расчеты выбросов черного углерода, проведенные по методике 1 и 2 уровней, дают в сумме для всех источников стационарного сжигания топлива достаточно близкий результат. При применении расчетов с использованием национальных значений коэффициентов эмиссии, заметно более высокие оценки выбросов получаются для предприятий энергетической отрасли 4.14 тыс. т в год против 1.16 тыс. т в год при расчетах по 1 уровню. Близкие значения к расчетам по 2 уровню дает и база данных EDGAR – 3.67 тыс. т, а оценки, полученные в результате обзора ряда исследований в работе Эванс и др. (Evans et al., 2017), показывают существенно более высокое значение выбросов от энергетической отрасли России, равное 16.4 тыс. т.

Оценки выбросов черного углерода от производственных предприятий практически совпадают по оценкам 1 и 2 уровня и по данным работы Эванс и др. и составляют 5-7 тыс. т, в то время как по базе данных EDGAR они значительно ниже – 2.4 тыс. т. В обзоре (Evans et al., 2017) отмечается, что неопределенность эмиссии ЧУ в России в категории «Обрабатывающие производства» очень велика и оценивается в пределах от 1 тыс. т до 51 тыс. т с центральной величиной 5.1 тыс. т.

Для малого сжигания (коммерческое, бытовое и сельскохозяйственное), наоборот, оценки сделанные авторами с применением методики 1 и 2 уровня, хорошо совпадают с данным базы EDGAR и составляют 5.8-7.1 тыс. т, но рас-

ходятся с оценками Эванс и др., которые дают только для бытового сжигания 14 тыс. т, а в целом для отраслей малого сжигания 28.7 тыс. т. Такое расхождение в оценках связано с тем, что расчеты, сделанные в данной работе, основаны на данных официальной статистики о сжигание биомассы (преимущественно, древесины) населением для обогрева частных жилых домов, в то время, как в исследованиях, обобщенных в работе Эванс и др. (Evans et al., 2017), предполагается, что значительное количество древесины, сжигаемой населением, не учитывается в официальной статистике. Они ссылаются на Энергетическую стратегию России до 2020 года (Энергетическая стратегия..., 2003), в которой говорится, что из 50 млн м³ древесины, потребляемой в России, только 6 млн м³ были проданы официально. В данной работе при оценке по методу 1 и 2 использованы данные официальной статистики об отпуске населению древесины, составляющие в 2013 году 5.2 млн м³. Таким образом, существенные расхождения в оценках, сделанных авторами, и приведенных в работе Эванс и др., заключается в использование несопоставимых данных о деятельности. Если предположить расход древесины, равным 50 млн м³, то выбросы от бытового сжигания населением, оцененные по методике 2 уровня, составят 31 тыс. т.

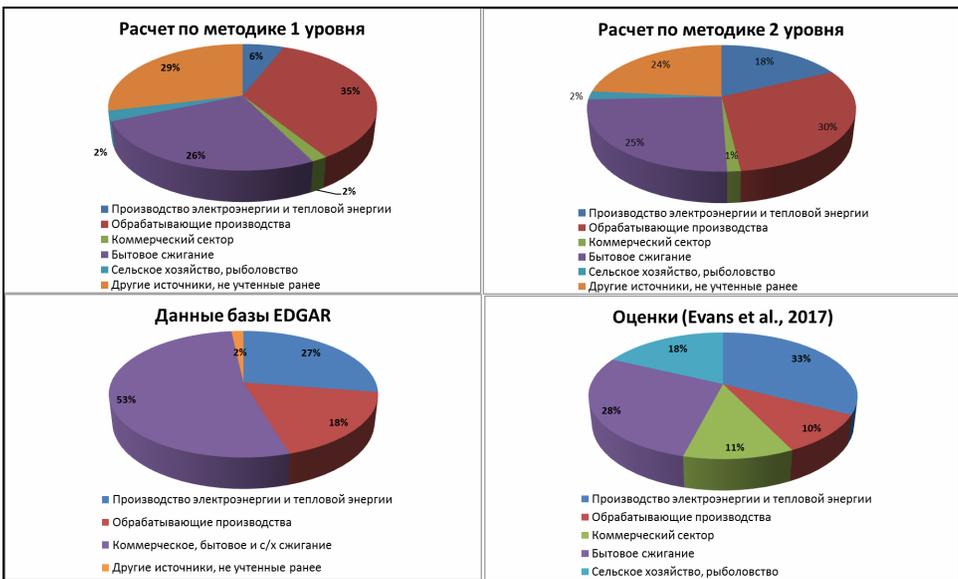


Рисунок 1. Вклад различных категорий в суммарные выбросы черного углерода при стационарном сжигании топлива в Российской Федерации в 2013 г.

На рис. 1 представлены вклады категорий источников в суммарные выбросы черного углерода при стационарном сжигании топлива в Российской Федерации в 2013 г. В целом выше уже обсуждались различия в подходах к распределению выбросов по категориям источников для разных оценок. Видно, что для всех приведенных оценок основной вклад в суммарный выброс черного углерода от стационарного сжигания топлива в России вносят бытовое сжигание (от 25 до 50%), сжигание топлива на промышленных пред-

приятиях (от 10 до 35%), на предприятиях энергетического сектора (от 6 до 33%). Надо отметить, что в базе данных ИГКЭ существенные объемы сжигаемого топлива, отнесены к категории «Другие, не учтенные ранее источники», что объясняет значительный вклад этой категории в суммарном выбросе черного углерода, полученном по методике 1 и 2 уровней.

Высокие значения выбросов от сжигания топлива в промышленности, полученные при расчете по методикам 1 и 2 уровня, могут быть обусловлены спецификой отчетности предприятий, при которой с высокой степенью вероятности, в суммарное значение сжигания дизельного топлива могут быть включены не только стационарные источники, но и сжигание дизельного топлива транспортными средствами, находящимися на балансе предприятия.

Таким образом, в дальнейшем для получения более точных оценок выбросов черного углерода от стационарных источников выбросов в России, необходимо уточнение данных о деятельности для каждой из категорий источников. Возможно, для получения более точной информации, необходимо будет учитывать не только данные официальной статистики, но и экспертные оценки потребления топлива населением.

Динамика выбросов черного углерода от стационарного сжигания топлива в России

Динамика выбросов черного углерода в категориях стационарного сжигания топлива в России оценена по методике 2 уровня с использованием национальных коэффициентов эмиссии, приведенных в табл. 4, для периода 1990-2018 гг. (рис. 2).

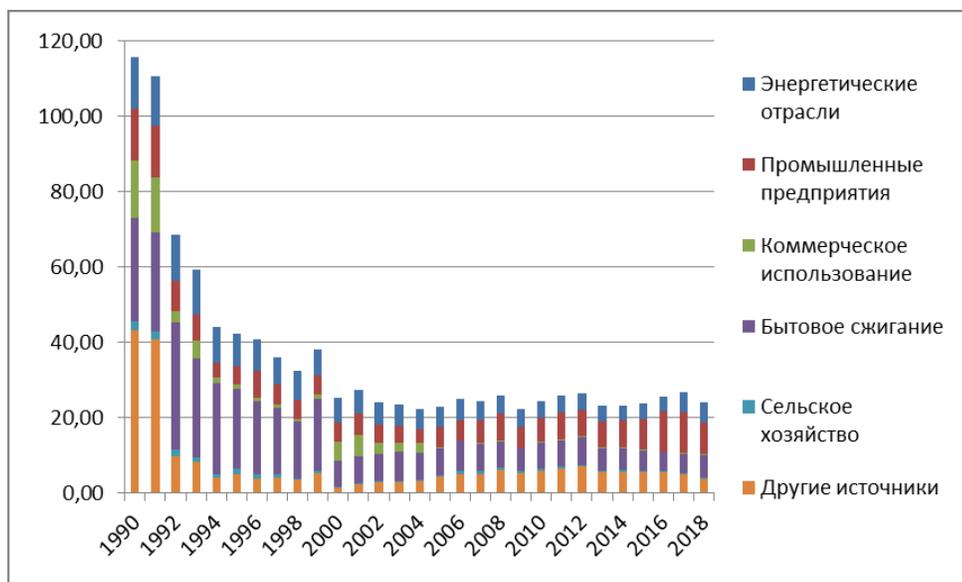


Рисунок 2. Динамика выбросов черного углерода от сжигания топлива по данным российских методик за 1990-2018 гг., тыс. т

Как видно из рисунка, динамика выбросов черного углерода за 1990-2018 гг. аналогична динамике совокупного выброса парниковых газов (НДК, 2019), что обусловлено использованием единой базы данных о деятельности.

В период с 1990 по 1998 гг. в Российской Федерации происходило уменьшение совокупного выброса черного углерода, затронувшее все категории источников. Это связано в первую очередь с отрицательной динамикой в экономическом секторе страны. В последующие годы, в период экономического роста (1999-2008 гг.), наблюдался некоторый рост выбросов. На динамике выбросов черного углерода отразилось падение производства, начавшееся после кризиса 2008 и 2014 годов. Выбросы ЧУ резко уменьшились с 1992 по 1999 гг. из-за отсутствия нефти и угля. Рост выбросов в 2016-2017 гг. от сжигания топлива промышленными предприятиями обусловлен увеличением количества сжигаемого жидкого топлива в 1.5 раза. Уменьшение выбросов от сжигания топлива населением (категория «Бытовое сжигание») связано с уменьшением количества сжигаемого твердого топлива в 1.3 раза и переходом на газ.

Таким образом, основными драйверами варьирования выбросов в Российской Федерации являются общие тенденции развития экономики (интегральным показателем которых является валовый внутренний продукт (ВВП), изменение общей энерго- и экономической эффективности, структуры ВВП и топливного баланса страны. Определенный вклад в изменение выбросов вносят общий тренд и межгодовые колебания температуры воздуха на территории РФ и вызываемые этими факторами изменения энергопотребления.

Для выбросов твердых частиц и, соответственно, черного углерода существенным фактором изменения выбросов может также стать использование лучших доступных технологий на предприятиях энергетического сектора, но для получения таких оценок необходима дополнительная информация о применяемых технологиях, что уже будет соответствовать расчету по 3 уровню.

Интересна так же оценка вклада каждой топливной группы в суммарные выбросы черного углерода, показанная в табл. 6 для данных, осредненных за период 2009-2018 гг., когда не происходило существенного изменения в структуре используемого топлива.

Таблица 6. Вклад каждой топливной группы в суммарные выбросы черного углерода при расчете по методике 2 уровня (среднее за период 2009-2018 гг.), %

Категория источника	Жидкое топливо	Твердое топливо	Газообразное топливо	Биотопливо
Производство электроэнергии и тепловой энергии	34	39	22	5
Обрабатывающие производства	57	39	1	2
Предоставление коммунальных и персональных услуг	53	30	2	15
Бытовое сжигание	4	44	3	49
Сельское хозяйство, рыболовство	58	5	1	36
Другие источники, не учтенные ранее	63	6	0	32

Наибольшие выбросы черного углерода при производстве электро- и тепловой энергии образуются при сжигании твердого топлива (39 %). Так же около 40% вносит сжигание твердого топлива в категориях «Обрабатывающие производства» и «Бытовое сжигание», а в категории «Коммунальные услуги» – 30%. Жидкое топливо вносит наибольший вклад в выбросы от категорий «Другие источники выбросов», «Обрабатывающие производства», «Коммунальные услуги» и «Сельское хозяйство» (53-63%). Вклад выбросов от газообразного топлива существенный только для категории «Производство электроэнергии и тепловой энергии». Биомасса вносит значимый вклад в категориях «Бытовое сжигание» и «Сельское хозяйство» (36-49%).

Для сравнения, оценки вклада каждой топливной группы в суммарные выбросы черного углерода (по методике 2 уровня) показали, что в периоды 1990-1998 гг. и 1999-2008 гг. вклад жидкого топлива в выбросы от энергетической промышленности был более весомым и составлял 45-55%. В производственных отраслях структура вклада различных топлив в выбросы черного углерода по сравнению с периодом 1999-2008 гг. практически не изменилась, а в период 1990-1998 гг. наблюдался гораздо более существенный вклад жидких топлив (в среднем за период - 63%). Структура вклада топливных групп в выбросы от жилого сектора («Бытовое сжигание») практически не изменилась за весь период с 1990 до 2018 годов. В категории «Сельское хозяйство, рыболовство» значительно выросла доля жидких топлив (с 21 до 58%). В категории «Другие источники, не учтенные ранее» значительно вырос вклад биотоплива (с 3 до 32%), но сократился вклад жидких топлив (с 89 до 63%).

Выводы

В статье рассмотрены методические подходы к оценке выбросов в атмосферу черного углерода при стационарном сжигании ископаемого топлива, приемлемые для использования в российских условиях. Для этого проведено сопоставление методики, рекомендуемой в руководствах ЕМЕП/ЕАОС для применения в национальных кадастрах Европейских стран о выбросах загрязняющих веществ, подготавливаемых в рамках обязательств по Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния, и национальных методик расчета выбросов загрязняющих веществ, утвержденных в России для расчета, нормирования и контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Проведены расчеты по методике 1 уровня, с использованием коэффициентов методики ЕМЕП/ЕАОС, и по методике 2 уровня, с использованием предложенных авторами национальных коэффициентов выбросов черного углерода, базирующихся на национальных коэффициентах выбросов сажи и твердых частиц. В качестве исходных данных о деятельности использовалась база данных ИГКЭ, применяемая для подготовки кадастра выбросов парниковых газов, в соответствии с обязательствами РФ по Рамочной конвенции об изменении климата ООН.

Наибольший разброс удельных значений выбросов твердых веществ характерен для твердого топлива. Авторами предпринята попытка уменьшения неопределенности за счет определения средней удельной зольности углей, используемых в качестве топлива в отдельных категориях. В результате неопределенность предложенных национальных коэффициентов удельных выбросов при сжигании твердого топлива существенно сократилась и составила +/- 48% для источников энергетической отрасли. Также значительно меньшей неопределенностью обладают национальные значения удельных коэффициентов выбросов черного углерода от жидких топлив (+/- 80%).

Средние значения удельных показателей выбросов черного углерода, полученные по данным национальных методик, для большинства видов топлива и категорий источников превышают значения, предложенные в методике ЕМЕП/ЕАОС. Наиболее заметно увеличение удельных коэффициентов выбросов при сжигании твердого топлива в энергетической промышленности (в 6.8 раз по сравнению с европейским коэффициентом), газообразного топлива в энергетической промышленности (в 4 раза), жидкого топлива при бытовом сжигании (в 4 раза) и жидкого топлива в энергетической промышленности (в 3.1 раза). Хорошо совпадают значения удельных показателей выбросов при сжигании биомассы и твердого топлива при бытовом и промышленном сжигании и газа при бытовом сжигании.

Верификация оценок выбросов черного углерода и твердых частиц, проведенная с использованием данных статистической отчетности предприятий, данных базы выбросов EDGAR и данными национального кадастра выбросов РФ, представленного в 2019 году в Конвенцию о трансграничном загрязнении воздуха, показывает хорошее совпадение суммарных значений и существенные различия в распределении выбросов по категориям источников. В целом расчеты по российским методикам приводят к несколько большим выбросам ЧУ, чем по коэффициентам ЕМЕП/ЕАОС.

При сравнении с данными базы EDGAR полученные в статье оценки выбросов черного углерода дают более высокие значения для категории сжигание топлива на промышленных предприятиях и на других, не учтенных ранее источниках выбросов. При этом достаточно хорошо совпадают оценки для источников энергетической отрасли и малого сжигания (коммерческое, бытовое, сельскохозяйственное). При этом оценки эмиссии в России, выполненные различными авторами и представленные в критическом отчете (Evans et al., 2017), превышают наши расчеты в категории централизованное производство тепло- и электроэнергии (в 4 раза) и бытовое сжигание (в 2 раза). В значительной степени это объясняется использованием различных данных о деятельности, особенно о сжигании древесины в жилом секторе.

Для получения более точных оценок выбросов черного углерода от стационарных источников в России необходимо уточнение исходных данных о сжигании топлива по категориям источников. Работа по уточнению национальных коэффициентов эмиссии также будет продолжена в дальнейшем по мере поступления данных для проведения расчетов на уровне предприятий или однородных групп источников выбросов.

Работа выполнена в рамках научной темы Росгидромета на 2000-2024 гг. «3.3. Развитие методов и технологий расчетного мониторинга антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов и короткоживущих климатически-активных веществ» и при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-05-60183//19- Арктика «Процессы и последствия дальнего атмосферного переноса черного углерода и радионуклидов в Арктике».

Список литературы

ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Теплотехническая часть технические требования.

ЕМЕП/ЕАОС. 2009. Руководство ЕМЕР/ЕАОС по инвентаризации выбросов 2009. Общие руководящие указания по подготовке национальных инвентаризационных выбросов. Технический отчет № 9. – ЕАОС, Копенгаген, 30 с.

ЕМЕП/ЕАОС. 2013. Руководство ЕМЕР/ЕАОС по инвентаризации выбросов 2013. Общие руководящие указания по подготовке национальных инвентаризационных выбросов. – ЕАОС, Копенгаген, 37 с.

ЕМЕП/ЕАОС. 2016. Руководство ЕМЕР/ЕАОС по инвентаризации выбросов 2016. Общие руководящие указания по подготовке национальных инвентаризационных выбросов. Технический отчет № 21. – ЕАОС, Копенгаген, 37 с.

ИДК. 2019. Информационный доклад о кадастре Российской Федерации. – М., МПР.

МГЭИК. 2006. Руководящие принципы МГЭИК 2006 года для национальных кадастров парниковых газов. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. – МГЭИК-ИГЭС-ОЭСР-МЭА, ИГЕС, Япония.

Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров. 1997. – М., 15 с.

Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. 1999. – Москва, НИИ Атмосферы, 68 с.

Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных дизельных установок. 2001. – СПб, 14 с.

Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/час. 1985. – М., Гидрометеоздат, 50 с.

Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от мусоросжигательных и мусороперерабатывающих заводов. 1986. – Академия коммунального хозяйства им. Г.Д. Памфилова, 20 с.

Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической перера-

ботке твердых бытовых отходов и промотходов. 1989. – Академия коммунального хозяйства им. Г.Д. Памфилова, 21 с.

Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. 2005. – Санкт-Петербург, НИИ «Атмосфера», 212 с.

НДК. 2019. Национальный доклад о антропогенных выбросах из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2017 гг. Часть 1. – М., 471 с.

Охрана окружающей среды в России в 2014 г. 2015. – Минприроды России, 473 с.

Перечень методик, используемых в 2019 году для расчета, нормирования и контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферных воздухах. 2018. – Санкт-Петербург, НИИ «Атмосфера», 25 с.

Российская энциклопедия по охране труда (в 3 томах). 2007. – М-во здравоохранения и социального развития Российской Федерации. /Отв. ред. А.Л. Сафонов. – Москва, Изд-во НЦ ЭНАС, 1248 с.

Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. 1986. – Л. Гидрометеоиздат, 184 с.

Справочник по удельным показателям выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для некоторых производств – основных источников загрязнения атмосферы. 2001. – Санкт-Петербург, НИИ «Атмосфера», 117 с.

Энергетическая стратегия России на период до 2020 года. 2003. – Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 августа 2003 г. № 1234-р.

AMAP 2011. The Impact of Black Carbon on Arctic Climate (2011). /By: P.K. Quinn, A. Stohl, A. Arneth, T. Berntsen, J.F. Burkhart, J. Christensen, M. Flanner, K. Kupiainen, H. Lihavainen, M. Shepherd, V. Shevchenko, H. Skov, and V. Vestreng. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Oslo, 72 p.

AMAP 2015. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. – Oslo, 116 p.

Evans M., Kholod N., Kuklinskib T., Denysenkoc A., Smith S.J., Staniszewskia A., Wei Min Haod, Liang Liue, Tami C. 2017. Black carbon emissions in Russia: A critical review. – Atmospheric Environment, No. 5, pp. 1-13.

U.S. EPA. 2012. Report to Congress on Black Carbon. – Washington, US Environmental Protection Agency, DC. – Available at: <http://www.epa.gov/blackcarbon/>.

Статья поступила в редакцию: 06.05.2020 г.

После переработки: 07.08.2020 г.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF BLACK CARBON EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE FROM STATIONARY FUEL COMBUSTION

V.A. Ginzburg^{1),2)}*, L.V. Kudryavtseva¹⁾, , M.S. Zelenova¹⁾

¹⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation;
* corresponding author: veronika.ginzburg@gmail.com

²⁾ Institute of geography RAS,
119017, Staromonetnyi lane, 29, Moscow, Russian Federation

Abstract. Considered the specific (per unit of produced energy), the coefficients of black carbon emissions from stationary fuel combustion in different sectors and economic activities, based on national methods of calculation of pollutant emissions approved in Russia. Compared them with the values recommended by the international methodology for inventory of emissions of pollutants EMEP. The techniques adopted in Russia, emission factors, taking into account the incineration characteristics of the equipment and the ash content of the fuel, allowing to carry out calculations at the enterprise level or homogeneous groups of sources (approach 2). The largest discrepancy happened in the category "generation of electricity and heat for common use". Here the emissions of PM_{2.5}, which is the source of black carbon can exceed international 2 - 20 times depending on the fuel ash content of fuel, the boiler capacity and the date of introduction into service. The assessments of emissions of particulate matter and black carbon in the Russian Federation in 2000-2018, according to the Russian methods, taking into account the ash content and the proportion of coal basins and deposits, used in various types of industries. The results can be used to assess the situation of black carbon emissions in Russia, but for international reporting in accordance with the country's commitments under the UN framework Convention on climate change and its Kyoto Protocol.

Keywords. Black carbon, soot, particular matter, stationary fuel combustion, emission factors, emission inventory, national methodology.

References

GOST R 50831-95 Ustanovki kotel'nye. Teplotekhnicheskaiia chast' tekhnicheskiiie trebovaniia [GOST R 50831-95 the installation of boilers. Thermal engineering part of the technical requirements]. (In Russian).

EMEP/EAOS. 2009. *Rukovodstvo EMER/EAOS po inventarizatsii vybrosov 2013. Obshchie rukovodiashchie ukazaniia po podgotovke natsional'nykh inventarizatsionnykh vybrosov* [Guidance EMEP/EEA emission inventory 2009. General guidelines for the preparation of the national inventory of emissions]. EEA, EAOS, Kopengagen.

EMEP/EAOS. 2013. *Rukovodstvo EMER/EAOS po inventarizatsii vybrosov 2013. Obshchie rukovodiashchie ukazaniia po podgotovke natsional'nykh inventarizatsionnykh vybrosov* [Guidance EMEP/EEA emission inventory 2013. General guidelines for the preparation of the national inventory of emissions]. EEA, EAOS, Kopengagen.

EMEP/EAOS. 2016. *Rukovodstvo EMER/EAOS po inventarizatsii vybrosov 2013. Obshchie rukovodiashchie ukazaniia po podgotovke natsional'nykh inventarizatsionnykh vybrosov* [Guidance EMEP/EEA emission inventory 2016. General guidelines for the preparation of the national inventory of emissions]. EEA, EAOS, Kopengagen.

IDK. 2019. *Informatsionnyy doklad o kadastra Rossiyskoy Federatsii* [Informational inventory report of the Russian Federation]. MNR, Moscow (In Russian).

MGEIK. 2006. *Rukovodyashchiye printsipy MGEIK 2006 goda dlya natsional'nykh kadaстров parnikovyykh gazov*. [2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories]. MGEIK-IGES-OESR-MEA, IGES, Japan, 2006.

Metodika opredeleniia i rascheta vybrosov zagriaznialiushchikh veshchestv ot lesnykh pozharov [Method of determining and calculating pollutant emissions from forest fires], 1997. (In Russian).

Metodika opredeleniia vybrosov zagriaznialiushchikh veshchestv v atmosferu pri szhiganii topliva v kotlakh proizvoditel'nost'iu menee 30 tonn para v ches ili menee 20 Gkal v chas, [Method of determining emissions of pollutants into the atmosphere during fuel combustion in boilers with capacity less than 30 tons of steam per hour, or less than 20 Gkal an hour]. 1999. Moscow. (In Russian).

Metodika rascheta vybrosov zagriaznialiushchikh veshchestv v atmosferu ot statsionarnykh dizel'nykh ustanovok [The method of calculation of emissions of polluting substances in atmosphere from stationary diesel plants]. 2001. St. Petersburg. (In Russian).

Metodicheskie ukazaniia po raschetu vybrosov zagriaznialiushchikh veshchestv pri szhiganii topliva v kotlakh proizvoditel'nost'iu do 30 t/chas [Methodical instructions by calculation of emissions from fuel combustion in boilers with capacity up to 30 t/h]. 1985. Moscow, Gidrometeoizdat Publ. (In Russian).

Metodicheskie ukazaniia po raschetu vybrosov zagriaznialiushchikh veshchestv v atmosferu ot musoroszhigatel'nykh i musoropererabatyvaiushchikh zavodov [Methodical instructions on calculation of emissions of pollutants into the atmosphere from waste incineration and waste recycling plants], 1986. (In Russian).

Metodicheskie ukazaniia po raschetu vybrosov zagriaznialiushchikh veshchestv v atmosferu ot ustanovok maloi proizvoditel'nosti po termicheskoi pererabotke tverdykh bytovykh otkhodov i promotkhodov [Methodical instructions on calculation of emissions of pollutants into the atmosphere from installations of small capacity for thermal processing of municipal solid waste and industrial waste]. 1989. Akademiia kommunal'nogo khoziaistva im. G.D. Pamfilova Publ. (In Russian).

Metodicheskoe posobie po raschetu, normirovaniu i kontroliu vybrosov zagriazniaiushchikh veshchestv v atmosferyni vozdukh [A methodological guide on the calculation, regulation and monitoring of emissions of polluting substances in atmospheric air]. 2005. St. Petersburg, NII Atmosphere Publ., 212 p. (In Russian).

NDK, 2019. *NATSIONAL'NYY DOKLAD O KADASTRE antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtzii poglotitelyami parnikovyykh gazov ne reguliruyemykh Monreal'skim protokolom za 1990-2018 gg.* [National inventory report on GHGs emissions in the Russian Federation]. Part 1. 2019. Moscow.

Okhrana okruzhaiushchei sredy v Rossii [Environmental protection in Russia]. 2014. (In Russian).

Sbornik metodik, 1986. *Sbornik metodik po raschetu vybrosov v atmosferu zagriazniaiushchikh veshchestv razlichnymi proizvodstvami* [Collection methods for calculating emissions of pollutants by various industries]. Leningrad. Gidrometeoizdat Publ. (In Russian).

Spravochnik, 2001. *Spravochnik po udel'nykh pokazateliyam vybrosov zagriazniaiushchikh veshchestv v atmosferu dlia nekotorykh proizvodstv – osnovnykh istochnikov zagriazneniia atmosfery* [Handbook of specific indicators of emissions of polluting substances into the atmosphere for some industries – main sources of atmospheric pollution] 2001. NII Atmosfera, St. Peterburg. (In Russian).

Energeticheskaya strategiya, 2003. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2020 goda. Utverzhdena rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 28 avgusta 2003 g. № 1234-r.* [Energy strategy of Russia for the period till 2020. It is approved by the order of the Government of the Russian Federation of August 28, 2003 No. 1234-r]. Moscow. (In Russian).

AMAP 2011. *The Impact of Black Carbon on Arctic Climate (2011)*. /By: P.K. Quinn, A. Stohl, A. Arneth, T. Berntsen, J.F. Burkhardt, J. Christensen, M. Flanner, K. Kupiainen, H. Lihavainen, M. Shepherd, V. Shevchenko, H. Skov, and V. Vestreng. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Oslo, 72 p.

AMAP 2015. *Arctic Monitoring and Assessment Programme, Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers*. – Oslo, 116 p.

Evans M., Kholod N., Kuklinskib T., Denysenkoc A., Smith S.J., Staniszewskia A., Wei Min Haod, Liang Liue, Tami C. 2017. *Black carbon emissions in Russia: A critical review*. – Atmospheric Environment, No. 5, pp. 1-13.

U.S. EPA. 2012. *Report to Congress on Black Carbon*. – Washington, US Environmental Protection Agency, DC. – Available at: <http://www.epa.gov/blackcarbon/>.