

Стратегический обзор научных исследований и подходящих методов контроля выбросов сажи

Июнь 2010 года



Международный совет по экологически чистому транспорту



Цель работы Международного совета по экологически чистому транспорту – существенно улучшить показатели воздействия деятельности на окружающую среду и производительности автомобилей, грузовиков, судов, самолётов и поддерживающих их транспортных систем для защиты и улучшения народного здравоохранения, окружающей среды, и качества жизни. Организация действует под руководством Совета сотрудников регулятивных органов и экспертов из ведущих международных автомобильных рынков, участвуя в Совете как частные лица на базе их опыта с проблемами качества воздуха и перевозки.

## ИХХТ следующие участники одобрили этот документ\*

**Майкл Уальш**

Международный консультант по перевозке  
Соединенные Штаты Америки

**Мэри Николс**

Председательница  
Калифорнийский совет воздушных ресурсов  
Соединенные Штаты Америки

**Доктор Адриан Фернандез Бремаунтз** Президент  
Национальный институт экологии  
Мексика

**Доктор Леонора Рохас Брачо**

Генеральный директор  
Исследование по загрязнению городов и регионов  
Национальный институт экологии  
Мексика

**Доктор Мартин Уилиямс**

Директор  
Программа по атмосферному качеству и  
промышленному загрязнению  
Департамент по вопросам окружающей среды,  
питания, и сельских дел Великобритания

**Доктор Аксел Фридрих**

Бывший директор  
Федеральное агентство по окружающим средам,  
перевозке, и шумовому загрязнению  
Германия

**Доктор Алан Ллойд**

Президент  
Международный совет по экологически чистому  
транспорту  
Соединенные Штаты Америки

**Дан Гринбаум**

Президент  
Институт влияний на здоровье Соединенные Штаты  
Америки

**Хиро Ханю**

Президент  
Международный институт транспорта Японии  
Япония

**Даганг Танг**

Директор  
Центр регулирования выбросов автомобиля в  
окружающий воздух  
Министерство природоохраны  
Китайская Народная Республика

**Доктор Ясухиро Дайшо**

Преподаватель инженерного искусства  
Университет Уаседы  
Япония

**Доктор Марио Молина**

Преподаватель  
Химический и биохимический факультет  
Калифорнийский университет в Сан-Диего  
Соединенные Штаты Америки; и,  
Президент  
Сентро Марио Молины  
Мексика

© 2009 г. Международный совет по экологически чистому транспорту (International Council on Clean Transportation)

\* Этот документ не обязательно представляет взгляды организаций или правительственных агентств, представленных участниками Международного совета по экологически чистому транспорту. Их подтверждения основаны на их опыте с вопросами качества воздуха и перевозки.

Следующие индивидуалы присутствовали на Международном семинаре по саже, 2009, который проводился с 5-ого до 6-ого января в Лондоне, Великобритании. Этот документ был информирован обсуждениями, которые держались на семинаре, и дополнительными разговорами с участниками семинара.\*

Доктор Алан Ллойд	Международный совет по экологически чистому транспорту	США
Анумита Рой Чоудри	Центр науки и окружающих сред	Индия
Доктор Аксел Фридрих	Международный консультант	Германия
Барт Крос	Калифорнийский совет воздушных ресурсов	США
Бен Де Ангело	Управление охраны окружающей среды США	США
Доктор Брус Хилл	Целевая рабочая группа по чистому воздуху	США
Катарин Уитерспун	Консультант, Фонд «Климатуоркс»	США
Доктор Дэвид Фейхи	Национальная администрация по океану и атмосфере	США
Доктор Дэвид Ли	Манчестер столичный университет	Великобритания
Доктор Дэвид Уарилоу	Департамент по вопросам окружающей среды, питания, и сельских дел	Великобритания
Денис Клейр	Институт для методики управления и устойчивого развития	США
Доктор Дру Шиндел	Колумбийский университет	США
Елиса Думитреску	Программа ООН по окружающей среде	Кения
Елен Баум	Целевая рабочая группа по чистому воздуху	США
Доктор Не Кебин	Университет Цингхуа, Китай	КНР
Доктор Джеймс Корбет	Делавэрский университет	США
Доктор Ян Фуглстведт	Центр для международного исследования по климату и окружающей среде	Норвегия
Джон Гай	Управление охраны окружающей среды США	США
Кейт Блумберг	Международный совет по экологически чистому транспорту	США
Доктор Кит Шайн	Редингский университет	Великобритания
Доктор Ричард Миллс	Глобальный форум по загрязнению воздуха	Великобритания
Доктор Кирк Смит	Калифорнийский университет в Беркли, Факультет народного здравоохранения	США
Доктор Леонора Рохас Брачо	Национальный институт экологии	Мексика
Доктор Марк Джакобсон	Стэнфордский университет	США
Мартин Грин	фирма Джонсон Матти ПЛС	Великобритания
Доктор Мартин Рохолл	Фонд климата Европейского союза	Германия
Доктор Мартин Уилямс	Департамент по вопросам окружающей среды, питания, и сельских дел	Великобритания
Майкл Уальш	Международный консультант	США
Доктор Оливье Бушер	Центр им. Хэдли, у метеорологического офиса	США
(Мэт офис Хэдли центр)	Великобритания	Великобритания
Доктор Пирс Форстер	Лидский университет	Великобритания
Рей Минхарес	Международный совет по экологически чистому транспорту	США
Доктор Тами Бонд	Иллинойсский университет в Урбане и Шампейне	США
Тим Уилямсон	Департамент по вопросам окружающей среды, питания, и сельских дел	Великобритания

\* Все представления и материалы распределенные на семинаре в Великобритании имеющиеся по Интернету у сайта: <http://www.theicct.org> Присутствие на семинаре в Великобритании не обязательно указывает подтверждение этого документа. Международный совет по экологически чистому транспорту принимает единственную ответственность для своего содержания.

## РАБОЧЕЕ РЕЗЮМЕ

Данный документ содержит стратегические рекомендации, касающиеся выбросов сажи. Представленная в нем информация согласуется с данными «Четвертого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата» (МГЭИК), опубликованного в 2007 году, и основана на результатах работы прошедшего в Лондоне в 2009 году первого Международного семинара по саже (International Workshop on Black Carbon)<sup>1</sup> и последующих дискуссиях с его участниками.

**Сажа представляет собой твердые частицы, образующиеся в результате неполного сгорания.** Все частицы, возникающие в процессе горения, являются твердыми частицами (ТЧ) размером до 10 микрометров (ТЧ 10) или менее 2,5 микрометра (ТЧ 2,5). Сажа относится к последней категории. Ее частицы поглощают энергию солнечного света и преобразуют ее в тепловую. В результате попадания в атмосферу и оседания на снежных или ледяных поверхностях сажа вызывает изменения глобальной температуры, таяние снега и льда, смену режима осадков.

**Сгорание традиционного транспортного топлива, сжигание твердого биотоплива в целях обогрева и приготовления пищи, горение биомассы в результате лесных пожаров и сельскохозяйственной деятельности служат причиной почти 85% глобальных выбросов сажи.** К 2030 году можно добиться ее возможного снижения на 2,8 Тг/год, что составляет 59% от общего выброса на сегодняшний день. Местоположение и химический состав будут определять конечный результат влияния стратегий контроля выбросов на климат.

**Защита здоровья человека сама по себе является сильным аргументом в пользу действий, направленных на борьбу с выбросами сажи.** Последние ежегодно служат причиной сотен тысяч смертей по всему миру. Действия, направленные на снижение выбросов ТЧ, такие как переход на более экологичные виды топлива, использование более чистых технологий, снижение потребления топлива, в значительной степени способствуют сокращению количества выбрасываемой сажи. Помимо положительного влияния на климат, снижение

выбросов благотворно сказывается на здоровье населения.

**Отрицательное влияние выбросов сажи на климат подчеркивает необходимость в действиях, направленных на их снижение.** Согласно МГЭИК, сажа является третьим крупнейшим агентом, вызывающим разогрев атмосферы и тем самым приводящим к изменению климата.<sup>2</sup> Неофициальные подсчеты МГЭИК показывают, что один килограмм сажи обладает тепловым воздействием<sup>1</sup> в 460 раз большим, чем такое же количество углекислого газа, если речь идет об интервале времени в 100 лет. В случае 20-летнего периода этот показатель будет равняться 1600.<sup>3</sup> Подсчеты МГЭИК, касающиеся разогревающего эффекта сажи, являются достаточно консервативными по сравнению с другими данными, приводимыми в литературе.

**Контроль выбросов сажи будет иметь скорое положительное воздействие на климат на региональном и глобальном уровнях.** Наряду с другими аэрозольными частицами, сажа вымывается из атмосферы через несколько тысяч километров от источника загрязнения, поэтому ее тепловой эффект сравнительно недолговечен. При этом возникающие климатические изменения могут значительно превышать региональный уровень и приближаться к глобальному масштабу. В совокупности такие региональные эффекты могут складываться в глобальную проблему. Разработка стратегии по предотвращению изменений климата, которая включает в себя контроль за выбросами агентов с коротким сроком действия, примером которых служит сажа, будет способствовать более быстрому снижению положительного теплового воздействия, приводящего к климатическим изменениям. Особенно это касается тех случаев, когда необходимы срочные меры для предотвращения широкомасштабных последствий, таких как сокращение площади арктических льдов в летний период, таяние ледников Гималайско-тибетского нагорья, разрушение Гренландского ледового щита.

**Контроль за сокращением выбросов сажи дополняет, но не заменяет действия, необходимые для сокращения выбросов углекислого газа и других парниковых газов.** Меры по предотвращению изменений климата

направлены, главным образом, на полное прекращение положительного теплового воздействия. Учитывая, что углекислый газ является основным агентом с такими свойствами, промедление с действиями, направленными на сокращение выбросов CO<sub>2</sub>, способствует увеличению его влияния на климат. Совместные действия по снижению выбросов сажи и углекислого газа будут оказывать более сильное влияние на снижение разогревающего эффекта парниковых агентов.

**Контроль за сокращением выбросов сажи будет способствовать снижению как положительного, так и отрицательного теплового воздействия, поэтому действия, предпринимаемые в контексте изменений климата, должны учитывать суммарный эффект.** Сажа выбрасывается в атмосферу вместе с другими загрязняющими веществами, которые отражают свет и тем самым снижают ее разогревающие свойства. Сюда относятся первичный и вторичный органический углерод, сульфаты и нитраты, которые образуются в различных количествах в зависимости от характера горения и типа горючего. Суммарный эффект таких выбросов будет зависеть от явлений переноса сажи и ее осаждения на снежных или ледяных поверхностях. Таким образом, даже если выбросы сажи сопровождаются выбросами веществ с отрицательными тепловыми характеристиками, их суммарный разогревающий эффект все равно может быть положительным в случае, если достаточное количество сажи осаждается в Арктике или на поверхности горных ледников.

**Задачами наибольшей важности в контексте изменений климата является борьба с источниками суммарного положительного теплового воздействия, такими как сжигание малосернистых видов топлива и последующее отложение сажи на снежных и ледяных поверхностях.** Тяжелые грузовые автомобили, сельскохозяйственная и строительная техника, обогрев углем в жилом секторе, промышленные печи для обжига кирпича – все это примеры источников суммарного положительного теплового воздействия. Открытое сжигание, практикуемое в сельском хозяйстве, использование биотоплива в жилом секторе, торговое судоходство могут служить примерами отрицательного

теплового воздействия; тем не менее, отрицательные воздействия этих источников сажи могут быть нейтрализованы, если частиц сажи осаждаются на снежных или ледяных поверхностях.

## НАУЧНАЯ ОЦЕНКА

Деятельность человека вызывает изменения климата на Земле. Одним из наиболее важных изменений является рост средней глобальной температуры, причиной которого служит поглощение отраженного инфракрасного излучения парниковыми газами и некоторыми аэрозолями. Метеорологи называют это свойство положительным тепловым воздействием на атмосферу. Под отрицательным воздействием понимают отражение излучения, которое ассоциируется с понижением температуры. Согласно подсчетам МГЭИК, результат положительного антропогенного воздействия на атмосферу с 1750 года составил, в среднем, 1,6 Вт/м<sup>2</sup> [от 0,6 до 2,4], что послужило причиной увеличения средней глобальной температуры на 0,8°C [± 0,2] со второй половины девятнадцатого века.

Понятие «сажа» (англ. «black carbon»)\*\* относится к любым частицам, которые образуются в процессе горения и обладают ярко выраженными светопоглощающими свойствами. Наиболее ярким представителем данной группы является копоть<sup>4</sup>. Размеры таких частиц различны, однако, в целом, они значительно меньше 2,5 мкм, чаще всего не более 0,1 мкм. Данные вещества всегда являются составной частью выбросов твердых частиц в атмосферу в результате сгорания. Тем не менее, их количество зависит от типа горючего, вида горения, эффективности технологий или мер по контролю выбросов.

Срок нахождения частиц сажи в атмосфере обычно не превышает одной недели. Однако этот показатель может достигать и трех недель в зависимости от типа сгорания и местоположения выбросов<sup>5</sup>. В отличие от сажи, срок существования углекислого газа в атмосфере намного длиннее. Большая часть CO<sub>2</sub>, выбрасываемого сегодня, будет оказывать влияние на климат в течение последующих 30-100 лет, а иногда и дольше.

Частицы сажи являются важными агентами, способствующими разогреву атмосферы и последующим изменениям климата. Это связано с их способностью поглощать световую энергию. Согласно подсчетам МГЭИК, положительное тепловое воздействие сажи может достигать  $0,34 \text{ Вт/м}^2 [\pm 0,25]^6$ . Результаты исследований, упоминающиеся в докладе МГЭИК, показывают, что разогревающие свойства сажи могут усиливаться, если ее частицы становятся частью или смешиваются с другими веществами, обладающими светорассеивающей способностью, например, с сульфатами<sup>7</sup>. Тем не менее, модели, используемые для расчетов МГЭИК, не учитывают такой эффект. Поэтому вполне вероятно, что приводимые выше цифры значительно занижены.

Последствием разогрева атмосферы является не только увеличение температуры, но и изменение режима осадков, а также снижение видимости в приземном слое. Струи выбросов могут подавлять конвективные потоки и стабилизировать атмосферу, тем самым препятствуя выпадению осадков. Выбросы затуманивают поверхность Земли и затрудняют процессы испарения, что мешает формированию облаков.

Благодаря разогревающим свойствам сажа также провоцирует изменения в отражательной способности или альбедо светлых поверхностей, таких как снег и лед. При обычных условиях такие поверхности отражают значительную часть солнечного света. Однако частицы сажи, располагающиеся на или над ними, способны абсорбировать большое количество солнечной энергии и выделять ее в виде тепла. Такой эффект может приводить к снижению количества отраженной солнечной энергии, а также может вызывать исчезновение облаков и таяние снега и льда. Таким образом запускается механизм обратной связи, при котором сокращение площади снежных и ледяных поверхностей способствует дальнейшему разогреванию атмосферы, в результате которого таяние снега и льда происходит еще быстрее. Согласно подсчетам МГЭИК, в результате снижения эффекта альбедо тепловое воздействие сажи может достигать  $0,1 \text{ Вт/м}^2 [\pm 0,1]$ .

Суммарное тепловое воздействие сажевых частиц с учетом изменения отражательной способности

светлых поверхностей, по данным МГЭИК, составляет  $0,44 \text{ Вт/м}^2 [\pm 0,35]$ . Это ставит сажу на третье место после углекислого газа и метана среди веществ, оказывающих влияние на изменение климата.

МГЭИК не уделяет сажевым частицам достаточного внимания. Например, предлагаемое ею определение сажи носит общий характер, а приводимый уровень теплового воздействия является минимальным от возможного. Такой подход является результатом того, что знание о саже развивается быстрыми темпами, в то время как процессы, связанные с фильтрацией, обсуждением и консолидацией научного опыта в данной области протекают очень медленно.

МГЭИК не провела измерений вклада частиц сажи в охлаждающий эффект облаков, хотя последний позволяет снизить их разогревающие свойства. Большинство используемых моделей не учитывают внутреннего смешивания, которое может усугублять тепловое воздействие частиц. Ожидается, что более пристальное внимание подобным недочетам будет уделено в следующем докладе МГЭИК, который выйдет в свет в 2013 году.

## СТРАТЕГИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

Снижение выбросов сажи будет благотворно сказываться на здоровье населения, что само по себе является важным аргументом. Доказано, что она принадлежит к той категории твердых частиц, которые являются причинами преждевременной смерти, инвалидности, хронических заболеваний. Частицы сажи могут быть сверхмалых размеров, не превышающих  $0,1 \text{ мкм}$  и представляющих большой риск для здоровья населения. Такие частицы попадают в атмосферу, прежде всего, из источников горения. Согласно подсчетам Всемирной организации здравоохранения, в 2000 году загрязнение воздуха в населенных пунктах послужило причиной 800 000 преждевременных смертей, в то время как от дыма, образующегося в результате сгорания твердого топлива, преждевременно скончались 1,6 миллионов человек. Большинство смертей было зафиксировано в развивающихся странах.

Разработка мер по снижению выбросов сажи будет способствовать более скорому решению проблем, связанных с изменением климата, чем действия, направленные лишь на борьбу с углекислым газом. Сажевые частицы принадлежат к немногочисленной категории веществ, приводящих к изменениям климата, однако срок их пребывания в атмосфере очень краток, поэтому контроль их выбросов будет способствовать быстрому снижению содержания сажи в воздухе. Стратегии по предотвращению изменений климата могут учитывать данное свойство сажи для достижения целей замедления скорости глобальных климатических изменений и снижения глобальной температуры. Помимо этого, такие стратегии могут способствовать задержке, а, возможно, и предотвращению широкомасштабных последствий на региональном уровне, таких как сокращение площади арктических льдов в летний период и таяние ледников Гималайско-тибетского нагорья. Потеря льдов происходит очень быстрыми темпами, однако принимая во внимание существенный локализованный вклад сажи в этот процесс, можно предположить, что снижение ее выбросов позволит существенно замедлить скорость таяния.

Мировое сообщество, занимающееся разработкой политики в области изменения климата, должно быть осторожным в выборе приоритетов, чтобы не подменить углекислый газ частицами сажи. Оба этих агента обладают разогревающими свойствами, приводящими к климатическим изменениям, и необходимо снижать содержание в воздухе их обоих. Наиболее приветствуются действия, направленные на максимальное снижение суммарного положительного теплового воздействия на атмосферу, поэтому меры, способствующие одновременному уменьшению количеств углекислого газа и сажи, будут более эффективными, чем контроль за этими агентами по отдельности.

Снижение выбросов сажи может оказаться необходимым для компенсации сокращения выбросов других короткоживущих агентов, например, диоксида серы. Выбросы этого вещества быстро сокращаются по всему миру благодаря введению запрета на использование серосодержащего топлива. Несомненно, подобные меры необходимы в связи с отрицательным воздействием оксидов серы на здоровье человека. В

то же время сульфаты обладают ярко выраженными светоотражающими свойствами или, другими словами, отрицательным тепловым воздействием. Уменьшение количества этих веществ в воздухе равносильно усилению положительного теплового воздействия. Следовательно, происходит дополнительный разогрев атмосферы, который необходимо замедлять за счет снижения выбросов сажи. Большая часть мер, предназначенных для контроля выбросов сажевых частиц, особенно в транспортном секторе, совпадает с действиями, направленными на сокращение выбросов серы.

## ПОТЕНЦИАЛ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ (ПГП)

Для политиков, осознающих стратегическую важность снижения выбросов сажи, следующим естественным шагом является вычисление для всех известных парниковых агентов потенциала глобального потепления (ПГП или GWP) и расчет суммарного эффекта снижения их выбросов в CO<sub>2</sub>-эквиваленте, а также выбор наиболее рентабельных стратегий контроля данных веществ. Сажевые частицы усложняют эти действия и, прежде всего, требуют ответа на несколько фундаментальных вопросов: Какова главная цель разрабатываемых мер? Следует ли включать сажу в общий список парниковых агентов? Если ответ положительный, то каким образом можно измерить вклад этих веществ в изменение климата? Ниже приводится информация, позволяющая сделать выбор в пользу того или иного весового коэффициента.

Потенциал глобального потепления (ПГП) является весовым коэффициентом, показывающим соотношение интеграла от теплового воздействия парникового газа к интегралу от теплового воздействия углекислого газа. Интеграл от теплового воздействия представляет собой суммарный тепловой эффект, оказываемый газом в течение определенного периода времени. Например, согласно «Четвертому докладу об оценках» МГЭИК, значение ПГП для метана в случае столетнего периода равняется 25. Это означает, что молекулы метана, попадающие в атмосферу в результате импульсных выбросов,<sup>8</sup> в течение срока их жизни разогревают атмосферу в 25 раз сильнее,

чем такое же количество углекислого газа на протяжении ста лет.

МГЭИК рассчитала ПГП для всех основных парниковых газов на периоды 20, 100 и 500 лет (ПГП<sub>20</sub>, ПГП<sub>100</sub> и ПГП<sub>500</sub> соответственно), поскольку выбор временного горизонта является необходимым требованием к применению данного показателя. Однако в случае с частицами сажи такой выбор может оказаться проблематичным, т.к. значения ПГП будут варьировать. Это объясняется тем, что коротко- и долгоживущие агенты обладают различными разогревающими способностями. Разогревающий эффект сажи может полностью прекратиться через 20 лет, в то время как тепловое воздействие CO<sub>2</sub>, который является «долгоиграющим» газом, уменьшится за этот период лишь частично. В случае более длительного периода времени, например 100 лет, тепловое воздействие сажевых частиц полностью прекратится, а разогревающий эффект углекислого газа будет приближаться к нулю. Следовательно, суммарный тепловой эффект этих газов будет тем меньше, чем длиннее выбранный отрезок времени. Это объясняет, почему ПГП<sub>100</sub> для сажи будет намного меньше, чем ПГП<sub>20</sub>.

Тем не менее, выбор временного горизонта должен зависеть не от оценки выбросов парниковых газов, а от постановки конкретных целей, направленных на снижение этих выбросов. Если главной задачей является предотвращение глобальных изменений на протяжении 100-летнего периода, то наиболее подходящим будет показатель ПГП<sub>100</sub>. В случае 20-летних изменений речь будет идти о ПГП<sub>20</sub>. Для учета собственных выбросов парниковых газов стороны Киотского протокола учитывают, в основном, 100-летний интервал времени. Это означает, что в расчет берутся долгосрочное воздействие и долгоживущие парниковые газы. Выбор 20-летнего интервала позволил бы уделять более пристальное внимание сажевым частицам и другим короткоживущим агентам, а также учитывать их краткосрочное воздействие на климат.

Сажа оказывает существенное влияние на климат. Об этом говорят значения ее ПГП. Хотя МГЭИК и не занималась их точным вычислением, графическую информацию по данному показателю можно обнаружить на рисунке 2.22 на странице 206

первого тома «Четвертого доклада об оценках» (2007), в главе под авторством Форстер и др. [Forster et al.]. В дополнение, таблица 2.5 на странице 164 того же источника содержит все необходимые данные для вычисления этого показателя для сажи. Ниже представлена формула для вычисления ПГП, приведенная на странице 210:

$$\text{ПГП}_i \equiv \frac{\int_0^{TH} RF_i(t) dt}{\int_0^{TH} RF_r(t) dt} = \frac{\int_0^{TH} a_i \times [C_i(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \times [C_r(t)] dt}$$

где ПГП<sub>i</sub> – интеграл по времени от среднего глобального значения теплового воздействия импульсных выбросов одного килограмма смеси *i* в сравнении с таким же количеством углекислого газа; TH – интервал времени; *a<sub>i</sub>* – эффективность теплового воздействия компонента *i*; [C<sub>i</sub>(*t*)] – наличие компонента *i*, зависящее от времени. Числитель и знаменатель представляют собой абсолютный потенциал глобального потепления (АПГП или AGWP), значения которого для CO<sub>2</sub> на периоды 20, 100 и 500 лет представлены на странице 211.

Учитывая, что средняя продолжительность жизни частиц сажи составляет менее одного года, их среднегодовое радиационное (тепловое) воздействие (RF) равняется интегралу от теплового воздействия для любого интервала времени (20, 100 или 500 лет). Если количество годовых выбросов известно для любого среднего значения RF, то их соотношение определяется интегралом RF на килограмм выбросов и равняется АПГП. Такой подход был применен ко всем данным, содержащимся в таблице 2.5, которые были получены в результате исследований, посвященных сравнению свойств аэрозолей (AEROCOM). Таким образом, были вычислены, а затем приведены к среднему арифметическому значения ПГП, представленные ниже в таблице 1. Такой подход можно считать консервативным, т.к. он учитывает ПГП только для прямого воздействия сажи и исключает непрямое воздействие и эффект альbedo.



Таблица 1. Потенциал глобального потепления (ПГП), вычисленный на основе данных из «Четвертого доклада об оценках» МГЭИК

	ПГП <sub>20</sub>	ПГП <sub>100</sub>	ПГП <sub>500</sub>
Сажа	1600	460	140
Метан	72	25	7,6
Закись азота	289	298	153
Оксиды серы	-140	-40	-12
Органический углерод	-240	-69	-21
Углекислый газ	1	1	1

Примечание: методика вычислений, применявшаяся в случае сажи, была использована также для органического углерода и оксидов серы. Значения для сажи, органического углерода и оксидов серы не публиковались МГЭИК и являются неофициальными.

Использование показателя ПГП подразумевает, что тепловой эффект сравниваемых парниковых агентов распределяется равномерно по всей атмосфере и не зависит от местоположения выбросов. Однако, если учитывать короткий срок жизни частиц сажи и их региональную концентрацию, то данное предположение не выдерживает критики. Короткоживущие аэрозоли распространяются на небольшие расстояния и имеют ярко выраженное региональное воздействие на атмосферу, иногда называемое «горячей точкой». Местоположение и продолжительность воздействия будут зависеть от местных условий, которые оказывают влияние на срок жизни и распространение веществ. Из этого следует, что две различные порции выбросов сажи с одинаковым ПГП не обязательно будут производить одинаковый тепловой эффект, т.е. значение ПГП для сажевых частиц не всегда может быть представлено в CO<sub>2</sub>-эквиваленте.

МГЭИК признает ограниченность использования ПГП в случае короткоживущих парниковых агентов и в докладе 2007 года призывает разработать для них новые показатели. В докладе говорится: «Для оценки возможного воздействия на климат короткоживущих агентов и для их сравнения с долгоживущими парниковыми газами необходимы [специальные] показатели»<sup>9</sup>. В 2009 году МГЭИК подтвердила статус ПГП в качестве стандартного показателя и в то же время предоставила широкое поле деятельности для разработки новых подходов к данному вопросу,

которые могут найти отражение в «Пятом докладе об оценках», подготавливаемом для публикации в 2013 году.<sup>10</sup>

Региональное тепловое воздействие сажи на атмосферу может оказывать влияние на климат как в региональном, так и в глобальном масштабе. Тепловой эффект может распространяться далеко за пределы местоположения агента. В совокупности множественные очаги разогрева создают глобальную проблему.

Показателем, альтернативным ПГП, является потенциал изменения глобальной температуры (ГТП). Он представляет собой соотношение изменения температуры в результате воздействия импульсных выбросов парникового агента к изменению температуры от импульсных выбросов углекислого газа. Долго- и короткоживущие агенты со сходными значениями ГТП будут оказывать равносильное воздействие на изменение среднегодовой глобальной температуры. Таким образом, показатель ГТП позволяет рассчитывать тепловое воздействие сажи в CO<sub>2</sub>-эквиваленте с большей точностью, чем ПГП. Однако даже в этом случае для разработки конкретной политики по борьбе с выбросами необходимо будет учитывать временной интервал.<sup>11</sup>

Хотя МГЭИК и упоминает показатель ГТП в своем последнем докладе, она не приводит для него каких-либо конкретных значений. В одной из недавно опубликованных научных статей под авторством группы ведущих ученых, участвовавших в написании вышеупомянутого доклада, приводятся расчетные данные, представленные ниже в таблице 2.

Показатель ГТП включает в себя параметр воздействия, располагающийся в начале причинно-следственной цепи и ближе к влиянию климата на общество, который подразумевает введение дополнительных неопределенных факторов, таких как чувствительность климата и время реакции климатической системы. По мере получения более точных данных в этой области необходимо будет произвести пересчет значений ГТП для различных выбросов. Подобно ПГП, значения ГТП будут варьировать в зависимости от исходных условий, но при этом не будут учитывать важные количественные показатели, связанные с уровнем

осадков или таянием снега. Несмотря на эти недостатки, ГТП может стать хорошей альтернативой ПТП.

Таблица 2. Потенциал изменения глобальной температуры (ГТП) для сажи и других агентов

	ГТП <sub>20</sub>	ГТП <sub>100</sub>
<b>Сажа</b>	<b>470</b>	<b>64</b>
Метан	57	4
Закись азота	303	265
Оксиды серы	-71	-10
Органический углерод	-41	-5,7
Углекислый газ	1	1

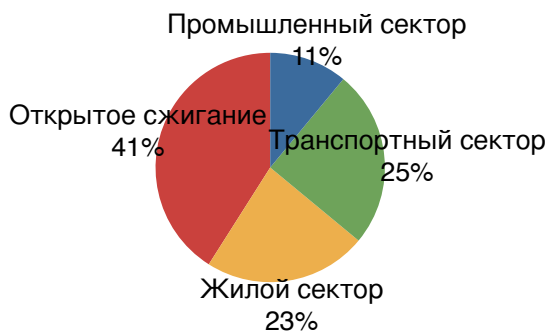
Источник: Фуглстведт, Я., К. Шейн, Т. Бернтсен, и др. (2009 г.) Воздействия перевозки на атмосферу и климат: показатели. Атмос Энвирон. [Fuglestedt, J., K. Shine, T. Berntsen, et al. (2009) Transport impacts on Atmosphere and Climate: Metrics. Atmos Environ.] В процессе публикации.

Без общей системы критериев, позволяющих сравнивать коротко- и долгоживущие парниковые агенты, лучше будет исключить сажу из такого анализа и разработать для нее отдельные задачи по снижению выбросов.

## ИСТОЧНИКИ И ЦЕЛИ

Последние учетные данные показывают, что основная масса частиц сажи образуется в процессе сгорания ископаемого топлива в результате деятельности промышленного, энергетического, транспортного и жилого секторов. Помимо этого, ощутимый вклад вносят бытовое сжигание биотоплива, лесные пожары и сельскохозяйственные палы.

Рисунок 1. Доля глобальных выбросов сажи от всех источников в 2000 году



источники выбросов и определение приоритетов [Bond, T. (2009) Black carbon: Emission sources and prioritization.] Доклад на Международном семинаре по саже, 5-6 января 2009 года, Лондон, Великобритания.

Обычно сажа выбрасывается в атмосферу в смеси с другими аэрозолями, некоторые из которых обладают светоотражающими свойствами. Поэтому в процессе выбора приоритетов необходимо учитывать не только химический состав выбросов, но также и их суммарную способность к поглощению или отражению света, а также величину этого показателя. Например, молекулы органического углерода и сульфатов хорошо отражают свет и, следовательно, могут значительно снижать разогревающий эффект сажи. Однако, если соотношение их количества к сажевым частицам невелико, то такие выбросы все равно будут обладать ярко выраженным тепловым эффектом. Такой анализ также должен принимать во внимание явления переноса сажи и ее осаждения на снежных или ледяных поверхностях. Выбросы, в результате которых большая часть сажевых частиц будет осажаться на таких поверхностях, будут приводить к сильному разогреву последних. Существует необходимость в дополнительных исследованиях, которые позволят определить точный порог перехода от отрицательного к положительному тепловому воздействию.

Основываясь на наших знаниях о химическом составе выбросов, образующихся в результате сгорания различных видов топлива, можно предположить, что сжигание ископаемого топлива с низким содержанием серы будет способствовать возникновению положительного теплового воздействия, в то время как бытовое сжигание биотоплива, открытое сжигание, сгорание топлива с высоким содержанием серы будут приводить к возникновению отрицательного теплового эффекта. При этом в случаях, когда источники горения располагаются вблизи снежных или ледяных поверхностей, может возникать локальный разогрев последних. Степень такого разогрева неизвестна, однако он может приводить к полной или частичной нейтрализации отрицательного теплового воздействия. Данный подход позволил составить таблицу 3, которая описывает наиболее значительные источники частиц сажи, в то время как таблица 4 содержит данные о значениях максимально возможного снижения уровней выбросов по категориям.

Таблица 3. Безотлагательные цели, направленные на предотвращение воздействия выбросов сажи на климат

<b>I. Сжигание дизельного топлива ...</b>	
А. тяжелыми грузовыми автомобилями;	
Б. внедорожной техникой (сельскохозяйственными, строительными и т.п. машинами).	
<b>II. Околоарктические выбросы, ...</b>	
В. возникающие из-за горения биомассы в процессе лесных пожаров или при проведении сельскохозяйственных палов;	
Г. возникающие из-за сгорания дизельного топлива в процессе коммерческих перевозок грузов.	
<b>III. Окололедниковые выбросы, ...</b>	
Д. возникающие в результате сжигания биотоплива в целях обогрева и приготовления пищи.	
<b>IV. Сжигание угля с низким содержанием серы ...</b>	
Е. в целях обогрева и приготовления пищи;	
Ж. в целях промышленного обжига кирпича.	

Таблица 4. Максимально возможное снижение уровней выбросов в 2030 году по сравнению с исходными условиями (Гг/год)

	Сажа	Органич-еский углерод	Оксиды серы
Промышленный сектор	621	502	457
Открытое сжигание	373	1,177	166
Транспортный сектор	1,032	397	1,950
Жилой сектор	750	2,404	2,043
<b>Всего</b>	<b>2,776</b>	<b>4,480</b>	<b>4,616</b>

Источник: Составлено на основе расчетов Международного института прикладного системного анализа (International Institute for Applied Systems Analysis); Майкл Уальш, международного консультанта; и Корбет и Уайнбрейк [Corbett & Winebrake], членов-корреспондентов в области исследований по энергетике и окружающей среде.

Примечание: Пересчет полученных значений в CO<sub>2</sub>-эквиваленте требует использования весового коэффициента ПГП или ГТП. Например, в 2030 году выбросы сажи для промышленного сектора в CO<sub>2</sub>-эквиваленте будут составлять с учетом 20-летнего ПГП 621\*1600=993600 мвт CO<sub>2</sub>-экв (ПГП<sub>20</sub>).

## СТРАТЕГИИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ

### Автомобильный транспорт

Жесткий контроль выхлопов в промышленно развитых странах, где действует большой объем автомобильного транспорта, таких как Соединенные Штаты и Европейский Союз, способствует значительному снижению глобальных выбросов сажи. В то же время, согласно прогнозам, к 2050 году мировой автомобильный парк увеличится в три раза.<sup>12</sup> Если не предпринимать никаких мер, то ожидается, что количество сажевых частиц в составе выхлопных газов снова возрастет и к 2050 году превысит уровень 2000 года на 20%.

Считается, что основными источниками сажи останутся тяжелые грузовые автомобили с дизельным двигателем. Однако не следует забывать и о существенном вкладе мотоциклов и маломощных авто, работающих как на бензине, так и на дизельном топливе.

Основной, наиболее эффективной стратегией борьбы с выбросами должна стать установка сажевых фильтров на машинах с дизельным двигателем. Это позволит незамедлительно и практически полностью избавиться от частиц сажи в составе автомобильных выхлопов при условии использования малосернистого топлива с максимальным содержанием серы 50 частей на миллион (част/млн). Наиболее рентабельным и эффективным будет использование сажевых фильтров при концентрации серы 15 част/млн и менее.

В случае автотранспорта необходимыми мерами будут разработка стандартов для новых автомобилей, которые потребуют наличия сажевых фильтров и использования малосернистого топлива, переоборудование старых авто и их оснащение фильтрами, эффективный контроль за выполнением требований, своевременный отказ от устаревших моделей. Все перечисленные меры уже были успешно применены в некоторых странах, что положительно сказалось на

качестве воздуха и состоянии здоровья населения.

Также следует уделить пристальное внимание мерам, направленным на одновременное снижение выбросов как частиц сажи, так и углекислого газа. Сюда относятся использование низкоуглеродного топлива, установка высокоэффективных двигателей, снижение веса автомобилей, повышение их аэродинамических свойств и даже введение «безуглеродного» режима управления. Важным аспектом является также регулирование спроса на транспортные перевозки, оказывающее непосредственное влияние на экономическое развитие и мобильность. Все перечисленные меры будут способствовать повышению эффективности транспортных систем, понижению стоимости их содержания и снижению их выбросов.

#### *Внедорожная техника*

Под категорию внедорожной техники подпадают морские перевозки, локомотивы, сельскохозяйственные и строительные машины и т.п. Вредные выбросы от этих источников менее изучены и поэтому регулируются в более слабой степени, чем автомобильный транспорт. При этом качество топлива для данной категории оставляет желать лучшего. Стратегии контроля выбросов таких машин сходны со стратегиями для предыдущей категории и включают установку специальных фильтров и использование малосернистого топлива. Стратегии для кораблей могут включать в себя такие меры как ограничение скорости, использование системы берегового электропитания в портах и т.д. Бункерное топливо, используемое на кораблях, содержит больше серы, чем автомобильное горючее. Тем не менее, благодаря недавно утвержденным требованиям, содержание в нем серы к 2020 году должно снизиться не менее чем на 80%. Учитывая, что нынешняя политика в данной области направлена на улучшение качества топлива через снижение содержания серы, очень важно, чтобы одновременно велась работа по сокращению выбросов сажи. В противном случае положительное тепловое

воздействие таких выбросов будет усугубляться.

#### *Уголь и биотопливо в жилом секторе*

Практически все бытовые угольные печи (от 80 до 100 миллионов) находятся в Китае, в то время как в других частях света для обогрева используется биотопливо. В настоящее время разрабатываются модели печей с повышенной теплоотдачей, рассчитанные на более экологичное топливо. Однако стратегии борьбы с выбросами для данной категории ограничиваются местной спецификой, связанной с наличием источников топлива и потребностями в обогреве и приготовлении пищи.

#### *Адресные промышленные источники*

Печи для обжига кирпича считаются основным промышленным источником выбросов сажи, хотя для подтверждения этого предположения требуются дополнительные исследования. Лидером по производству печного кирпича является Китай, за которым следуют Индия, Пакистан и Бангладеш. Снижения таких выбросов можно добиться путем внедрения более прогрессивных технологий.

#### *Открытое сжигание биомассы вблизи снежных и ледяных поверхностей*

В процессе открытого сжигания в атмосферу выбрасывается большое количество органического углерода, что на первый взгляд приводит к понижению температуры. Однако сажа, которая оседает на снежных и ледяных поверхностях, может приводить к их значительному таянию и потеплению на региональном уровне. Особенно это касается времен года, когда снег и лед наиболее чувствительны к повышению температуры. Для предотвращения подобных эффектов необходимо вводить сезонные запреты на сельскохозяйственные палы и использовать другие методы контроля сжигания биомассы.

# ВОПРОСЫ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

## *Учетные измерения*

«Четвертый доклад об оценках» МГЭИК приводит очень неопределенные данные по суммарному количеству выбросов сажевых частиц. Качество информации по некоторым подгруппам источников сажи также оставляет желать лучшего. Проводимые мероприятия по улучшению качества учетных данных должны включать в себя разработку и применение мер, способствующих направленному изучению качественного и количественного состава аэрозолей. Такие действия будут способствовать более правильному выбору целей и проведению необходимых видов анализа.

## *Потенциал глобального потепления*

Необходимо проведение исследований, позволяющих выяснить зависимость выбора показателя от разработки климатической политики. Также существует необходимость в изучении возможностей включения короткоживущих агентов в сферу действия политики по контролю за парниковыми газами; стоит ли применять к ним общие, либо индивидуальные подходы.

## *Влияние стратегий контроля на климат*

В целом, суммарный климатический эффект применения стратегий контроля аэрозолей, выбрасываемых из какого-либо источника, получается более ощутимым, чем эффект применения стратегий, направленных на сокращение выбросов одиночных загрязнителей. Тем не менее, для обоснования использования той или иной стратегии необходимо проводить исследования, позволяющие проанализировать влияние на климат выбросов из конкретного источника в конкретной географической местности.

## *Неопределенность данных о тепловых свойствах*

Данные о разогреве атмосферы, начиная с доиндустриальной эпохи, приводимые МГЭИК, в три раза отличаются от цифр, публикуемых в недавних выпусках уважаемых научных журналов. Объяснение причин такой разницы и достижение согласия по конкретным показателям значительно улучшило бы наше понимание о влиянии частиц сажи на глобальное изменение климата.

## **Выражение признательности**

Исходный материал для данного документа был предоставлен участниками лондонского семинара, проведенного в январе 2009 года. Далее мы провели кропотливый анализ «Четвертого доклада об оценках» МГЭИК, чтобы не пропустить ни одного упоминания о саже. Все обнаруженные нами данные были представлены здесь, в данной публикации. Неоценимую помощь и консультации по ППП и системе показателей в целом мы получили от Яна Фуглстведта и Терье Бернстен. Тами Бонд была бесконечно терпелива и великодушно не пожалела времени на просмотр и комментирование многочисленных промежуточных вариантов текста. Первый и последующие варианты прошли через три круга комментариев каждый, что составляет примерно 18 отдельных документов с применением компьютерной функции «Исправления». В комментировании участвовали Мартин Уильямс, Алан Ллойд, Майкл Уальш, Тами Бонд, Каттарин Уитерспун, Марк Джакобсон, Оливье Бушер, Елен Баум, Джон Гай, Ян Фуглстведт, Дру Шиндел, Елиса Думитреску, работники Программы ООН по окружающей среде и Кейт Блумберг. Им всем наша огромная благодарность.

## **Примечания**

1 Международный семинар по саже (International Workshop on Black Carbon) был организован Международным советом по экологически чистому транспорту (ICCT) и проводился в Лондоне 5-6 января 2009 года. С программой, списком участников и их докладами можно ознакомиться на сайте <http://www.theicct.org>.

2 Здесь имеется в виду суммарное тепловое воздействие в глобальном масштабе, начиная с эпохи, предшествующей индустриализации (1750-2005). Изменение климата является одним из его последствий.

3 Здесь имеется в виду интеграл от теплового воздействия, известный как потенциал глобального потепления (ППП), который вычисляется с учетом конкретного интервала времени. МГЭИК не обнаружил значений ППП для сажи, рекомендуя разработать альтернативную систему показателей для короткоживущих парниковых агентов. В то же время она опубликовала данные, позволяющие вычислить значения ППП, что и было сделано для данного обзора. Более подробное описание методики приводится в главе, посвященной потенциалам глобального потепления.

4 МГЭИК относит к категории сажи копоть, частицы древесного угля и устойчивые к высоким температурам органические соединения. Однако последние два наименования поглощают на единицу массы в 5-10 раз меньше солнечного света, чем копоть, поэтому значение их ППП будет меньше.

5 Таблица 2.5 в Форстер, П., В. Рамасуами, П. Артаксо, и др. (2007 г.)

Изменения атмосферных компонентов и радиационного воздействия. В докладе «Изменение климата, 2007 г.: физическая научная основа. Материал Рабочей группы I к Четвертому докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата об оценках». Издательство Кембриджского университета, Кембридж, Великобритания, и Нью-Йорк, Нью-Йорк, США. [Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, et al. (2007) Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.]

6 Там же. Таблица 2.13 на странице 207.

7 Разогревающие свойства сажевых частиц зависят от типа их смешивания. Сажа может быть составной частью других частиц (внутреннее смешивание) или представлять собой отдельную фракцию (внешнее смешивание). Симуляционные модели и лабораторные исследования показывают, что чаще всего преобладает первый тип, который ассоциируется с более сильным тепловым эффектом.

8 В результате импульсного выброса происходит мгновенное увеличение атмосферной концентрации газа или аэрозоля, обладающего способностями к изменению климата.

9 Форстер и др. [Forster et al.] (2007) страница 211

10 Итоговый доклад о результатах работы экспертной группы МГЭИК по разработке альтернативных показателей, 18-20 марта 2009 года, Осло, Норвегия.

11 Выбор временного интервала должен зависеть от конкретных целей и задач. Примерами могут служить цель Европейского Союза не допустить повышения глобальной температуры на более чем 2 градуса Цельсия или задача предотвратить сокращение площади арктических льдов в летний период.

12 Отчет Международного энергетического агентства о перспективах энергетических технологий за 2008 год. Доступен в Интернете по адресу <http://www.iea.org/Textbase/techno/etp/index.asp>

## Замечания по переводу

<sup>1</sup> В английской версии используется термин «radiative forcing», для которого не существует русского эквивалента. По сути, здесь имеется в виду тепловое воздействие на атмосферу, оказываемое парниковыми агентами в результате поглощения ими инфракрасного излучения, отраженного от Земли, и его превращения в тепловую энергию, отдача которой приводит к повышению температуры окружающей среды. В тексте встречаются понятия «positive radiative forcing» и «negative radiative forcing», положительное и отрицательное тепловое воздействие соответственно. Под первым термином понимается

непосредственно повышение температуры, в то время как второй связан с понижением температуры, вызванным светоотражающими свойствами некоторых веществ (*прим. переводчика*).

<sup>2</sup> В русском языке пока не существует устоявшегося термина, точно соответствующего английскому «black carbon». В литературе можно встретить такие варианты перевода как сажа, чистый углерод, черный углерод, технический углерод и т.п. Наиболее близкое по смыслу понятие – сажа или частицы чистого углерода (*прим. переводчика*).