

Интервью с ведущим научным сотрудником Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ им. Ломоносова к.ф.-м.н О. Б. Поповичевой «Аэрозоли горения и климат»

При сжигании ископаемых видов топлива и биотоплива, при открытом горении биомасс (при лесных и степных пожарах) в атмосферу выбрасываются парниковые газы (двуокись углерода, метан и др.) и мельчайшие аэрозольные частицы, которые могут оказывать влияние на радиационные свойства атмосферы, облачность, климат. Одним из последствий эмиссии аэрозолей горения (АГ) является изменение альbedo подстилающей поверхности за счет оседания частиц на покрытые снегом и льдом территориях. Как показывают результаты спутниковых наблюдений, АГ способны переноситься на сотни и тысячи километров от источника эмиссии и формировать постоянно живущий аэрозольный слой атмосферы. В последние годы с развитием приборов и методов измерений исследования АГ и последствий их эмиссии в атмосферу существенно расширились. Все мировые агентства по мониторингу атмосферы приняли аэрозоль горения как второй короткоживущий трассер глобального потепления после диоксида углерода, необходимый для постоянного мониторинга.

Обобщение результатов исследований влияния эмиссии аэрозолей горения на климат представлено в опубликованном в 2008 г. 4-ом Оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm.pdf>. В докладе содержатся рекомендации по возможным методам снижения выбросов из источников горения в атмосферу. Недавно опубликован отчет АМАР (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2011, <http://www.amap.no>), посвященный влиянию АГ на климат Арктики.

О последних результатах исследований свойств аэрозолей горения и их роли в климатических изменениях бюллетеню «ИК» согласилась рассказать ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики (НИИЯФ, <http://www.sinp.msu.ru/>) МГУ им. Ломоносова к.ф.-м.н. О.Б. Поповичева.

Подробнее об авторе. к.ф.-м.н, Ольга Борисовна Поповичева - ведущий научный сотрудник НИИЯФ МГУ, эксперт комиссии ЕС по программе "Global Change and Ecosystem" и рабочей группы комитета ICAO, Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP), Председатель Рабочих Совещаний ISAIE, ASEFI и International Workshop on BC Reference material.



О. Б. Поповичева

1) Уважаемая Ольга Борисовна, большое спасибо, что согласились ответить на наши вопросы. Расскажите, пожалуйста, что представляют собой аэрозоли горения и, какие основные направления исследований получили наибольшее развитие в последние годы?

Аэрозоли горения являются продуктом неполного сгорания ископаемых топлив и биомасс, обнаруживаются в атмосфере, в почве, в осадках как длительный геохимический сток углерода и трассер антропогенной активности. Глобальные оценки эмиссии углеродсодержащих субмикронных аэрозолей достигают 12-17 М Тонн/год в индустриальных районах и до 20 М Тонн/год в районах массовых пожаров. Их средняя концентрация изменяется в пределах от 0.004 до 0.5 см⁻³ в зависимости от источника эмиссии и его удаленности. В настоящее время вклад от сжигания природных ископаемых топлив в индустриальных установках и отопительных системах, от сжигания дизельного топлива в транспортных системах, от горения биомасс при природных пожарах лесов и при сжигании биотоплива для отопления домов составляет порядка 25% от всей эмиссии аэрозолей с поверхности Земли.

Частицы сажи определяют состав АГ при сжигании углеводородных топлив, состоят из элементного и органического углерода (EC/OC), имеют размеры 0.1-0.5 мкм и существуют в атмосфере в виде агломератов первичных наночастиц диаметром 20-40 нм.

Рис.1а демонстрирует типичные сажевые агломераты, эмитируемые дизельным двигателем MAN. При горении тяжелого мазутного топлива в атмосферу эмитируются частицы сажи в смеси с сульфатами, обугленными частицами несгоревшего топлива, оксидами и солями металлов и неметаллов.

Эмиссия судового двигателя на рис.1б показывает многообразие форм и размеров многокомпонентных АГ. При сжигании биомасс и древесины образуются, в основном, органические аэрозоли и

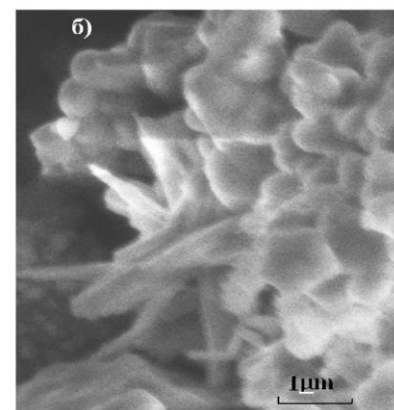
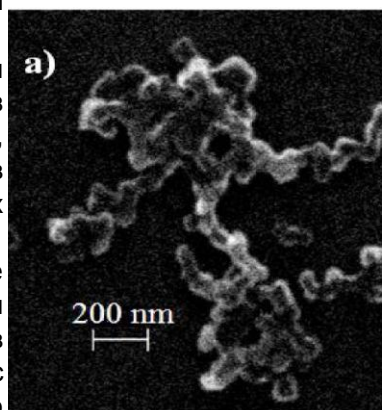


Рис.1. Аэрозоли горения в эмиссии дизельного и судового двигателей (Поповичева и др. 2010).

соли щелочных металлов; частицы сажи эмитируются в очень малом количестве. Многообразие состава и свойств АГ определяет значительные последствия их эмиссии в атмосферу. ЕС (элементарный углерод) эффективно поглощает солнечное излучение и инфракрасное излучение нагретой поверхности земли, таким образом, может влиять на потепление атмосферы. Хорошо поглощающие АГ в английской литературе называются black carbon (BC), отсюда в русском переводе появилось название «черный углерод». Эмиссия АГ может привести и к существенному глобальному потемнению атмосферы. Данные об атмосфере, собранные с 3250 метеорологических станций по всему миру, показали, что за последние 30 лет количество солнечного света, достигающего земной поверхности, снизилось почти над всей территорией планеты.

В последние годы наибольшее развитие получили исследования глобальных последствий эмиссии АГ, определяемые эффектами воздействия на радиационный баланс и облачность атмосферы. В настоящее время оценки прямого радиационного эффекта АГ в глобальных климатических моделях от всех источников достигают 2 Вт/м^2 , что всего в два раза ниже парникового эффекта от эмиссии CO_2 . В результате, благодаря антропогенной эмиссии АГ предсказывается глобальный эффект ежегодного увеличения усредненной температуры поверхности Земли на 0.4K .

Аэрозоли горения могут влиять на радиационные свойства облаков, изменяя их микрофизические и оптические свойства. Схема 1 демонстрирует основные климатические эффекты АГ, прямой радиационный и вторичные эффекты. Первый вторичный эффект связан с увеличением концентрации облачных капель при активации АГ как облачных ядер конденсации, что приводит к понижению радиуса облачных капель при определенной влажности в атмосфере (эффект радиуса). Хорошо поглощающие углеродсодержащие частицы могут индуцировать особый эффект нагрева, связанный с нагревом воздуха и приводящий к испарению облаков, который может изменять вертикальный профиль температур и динамическую структуру облаков. Второй вторичный эффект наблюдается при уменьшении радиуса облачных капель, что приводит к понижению скорости осаднения и более длительному времени жизни облаков и, тем самым, к более высокому облачному покрытию (эффект времени жизни). Глобальным результатом вторичных эффектов может являться увеличение отражения солнечного излучения от этих облаков и, следовательно, эффект охлаждения атмосферы.



Схема 1. Глобальные климатические и локальные эффекты аэрозолей горения

Возрастающий интерес вызывают в настоящее время региональные эффекты воздействия АГ на здоровье. Эмиссия аэрозолей транспортных систем признана самым большим источником неопределенности в оценках воздействия на качество воздуха. Частицы сажи являются опасным загрязняющим веществом для здоровья людей, особенно, в районах интенсивного транспорта (вблизи дорог, аэропортов и портов). Мелкая фракция с диаметром менее 2.5 микрон является наиболее токсичной; такие частицы вызывают и усиливают дыхательные, сердечно-сосудистые и аллергические заболевания.

2) Какие регионы являются основными источниками АГ в Северном полушарии? Как можно оценить вклад отдельных стран в общий выброс АГ? Изменились ли выбросы АГ в последние 10-20 лет?

Основные регионы эмиссии АГ оцениваются по количеству сжигаемого топлива различными источниками, по территории, занятой пожарами, и используемым технологиям сжигания. Вклад отдельных стран определяется по описанию источников горения и уровню используемых технологий сжигания. Рис.2 демонстрирует распределение эмиссий горения от антропогенных и природных источников в различных регионах Земли с максимальной концентрацией в густонаселенных районах Европы, Азии и Южной Америки.

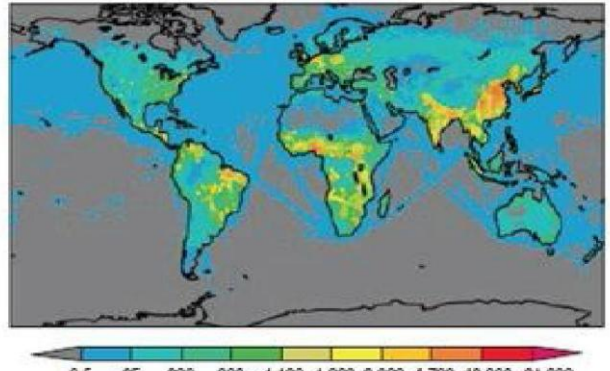


Рис.2. Распределение эмиссии аэрозолей горения в мегатоннах в год (Bond et al., JGR, 2004,109, D14203).

За последние 10-20 лет изменился вклад отдельных регионов в эмиссию АГ. Ранее Северная Америка и Западная Европа являлись главным регионами эмиссии аэрозолей горения, но в наши дни их место заняли развивающиеся азиатские страны.

Оценки ежегодных эмиссий аэрозолей горения в России составляют ~0.2МТ. В жилом секторе в результате сжигания древесины и биотоплива эмитируется до 49% аэрозолей; эмиссия дизельных двигателей машин и грузовиков (дорожный транспорт), тракторов и бульдозеров (внедорожный транспорт) составляет 19% и 12%. Промышленные и энергетические станции эмитируют ~12%, в то время как остальные источники сельскохозяйственных выбросов дают ~21% аэрозолей. При этом в России в настоящий момент отсутствует официальный реестр эмиссии твердотельных продуктов горения. Аэрозоль горения не принят как независимый и необходимый для постоянного мониторинга, а мониторингу подлежит только полная масса всех аэрозолей. Поэтому в настоящее время все описания эмиссий горения основаны на оценках возможных сценариев эмиссии, а не анализе реальной информации (Bond et al., 2004; Cofala et al., 2007). Из-за отсутствия постоянного мониторинга пожаров на территории России эмиссия природных пожаров не оценивается, несмотря на огромные пространства в Сибири, ежегодно охваченные пожарами. Ситуация усложняется эмиссией лесных пожаров в Европейских части России, где значительный вклад вносят торфяные пожары (как это случилось во время сильнейшего смога в центральном регионе в августе 2010 г). В результате возникают большие неопределенности в глобальном мониторинге и значительные ограничения в использовании каких-либо траекторных и глобальных климатических моделей для региональных прогнозов на территории России.

3) Почему влияние АГ на климат, радиационные свойства атмосферы особенно важно для Арктики?

Арктический климат особенно чувствителен к изменениям в гидрологических циклах и наличию аэрозолей, формирующих арктическую дымку. АГ способны изменять отражательную способность снега и льда при осадении и ускорять таяние льда. Показано, что снижение отражательной способности льда и снега вследствие оседания углеродосодержащих частиц усиливает глобальное потепление в три раза эффективнее, чем CO₂. Оценки увеличения температуры поверхности в Арктике приблизительно на 1.5⁰К за последних три десятилетия привели к выводу об особой чувствительности Арктики к потеплению. Несмотря на большую территорию, покрытую Российской Арктикой, информация об этой области крайне скудная, особенно это касается качества воздуха и влияния эмиссии источников горения на климат. Оценивается, что эмиссия в Арктику Россией составляет 10-15% от мировой эмиссии углеродосодержащих аэрозолей, и более 50% эмитируется к северу от 60⁰ с.ш., в основном, благодаря пожарам сибирских северных лесов, увеличивающим аэрозольную нагрузку в Арктике, нагревающим среднюю тропосферу и стимулирующим осадение на снег хорошо поглощающих частиц. Как показали траекторные модели, антропогенная эмиссия и горение тропических биомасс в Южной Азии оказывают более существенное влияние на появление арктической дымки даже по сравнению с Россией.

4) Как Вы оцениваете выводы американских ученых, опубликованных в 2010 г. в журнале «Geophysical Research Letters»* о том, что аэрозоли пожаров на юге России переносятся на Аляску и могут приводить к изменению альbedo подстилающей поверхности в Арктике?

В данной работе в ходе самолетной измерительной кампании в апреле 2008 года были определены состав и распределения по размерам объемных концентраций аэрозолей на Аляске. Для определения источников эмиссий и их транспорта из удаленных районов использовалась Лагранжевая дисперсионная модель. В это время на юге России были зарегистрированы сезонные пожары в результате массовых сельскохозяйственных работ, проводимых после таяния снега. По наличию ряда газофазных (ацетонитрил) и аэрозольных (калий) трассеров продуктов горения был сделан вывод о значительном влиянии эмиссии сжигаемых биомасс на арктический аэрозоль в весеннее время. Наиболее важным результатом этой работы является демонстрация количественных данных о том, что массовая концентрация хорошо поглощающих аэрозолей на Аляске во время сезонных пожаров возрастает на 260%(!), по сравнению с фоновой

концентрацией, и меры предотвращения пожаров в России и Китае в весеннее время таяния снега могут оказать существенное воздействие на климат Арктики.

(* *Warneke C., K. Froyd, J. Brioude et al., An important contribution to springtime Arctic aerosol from biomass burning in Russia Geophys. Res. Lett., 2010, 37, L01801*)

5) Какие основные международные проекты по исследованию АС проводятся за рубежом?

Это, прежде всего, конечно, проекты развития мощной системы мониторинга источников горения и распределения АГ в атмосфере урбанизированных и удаленных районов, направленные на развитие приборов измерения массовой концентрации и распределения частиц по размерам, приборов для определения оптических свойств, состава, доли ОС/ЕС, счетчиков облачных и льдовыя ядер конденсации. Европейская программа *Global Change and Ecosystem* ежегодно поддерживает проекты мониторинга и оценок климатических изменений. Недавний проект Европейского Союза QUANTIFY (<http://www.pa.op.dlr.de/quantify>), объединивший 46 участников со всего мира, посвящен количественным оценкам влияния на климат эмиссии глобальных и европейских транспортных систем. Особое внимание уделено описанию эмиссии авиации и морского транспорта, как наименее изученной по сравнению с наземным транспортом. От России в данном проекте участвовали специалисты НИИЯФ МГУ, Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета (ЦАО) и Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ).

Группа НИИЯФ МГУ проводила исследования активационной способности частиц, эмитируемых реактивным двигателем самолета и дизельным двигателем корабля, формировать льдовыя ядра нуклеации в верхней тропосфере (при образовании конденсационного следа самолета и перистых облаков) и облачные ядра конденсации в пограничном морском слое (при формировании следов эмиссии кораблей).

Конечно, основное внимание во всем мире уделено климатическим исследованиям в Арктике и влиянию на климат этого региона АГ. В качестве примера можно привести Доклад Арктического Совета на эту тему (Arctic Council Task Force on Short-Lived Climate Forcers "Progress Report and Recommendations for Minister" <http://www.state.gov/documents/organization/164926.pdf>). Агентство по защите окружающей среды США (EPA) недавно объявило специальный проект, нацеленный на снижение эмиссии дизельных двигателей в Российской Арктике, выступило с инициативами по сокращению выбросов черного углерода от источников, работающих на дизельном топливе, в российской Арктике, провело Семинар "Борьба с загрязнениями, вызванными выбросами от дизельных установок, и применение экологически безопасных альтернативных технологий в Арктике" в Москве <http://www.russianarcticbc.org/ru/index.html>

6) Какие проекты по исследованию АС проводятся в нашей стране?

В настоящее время длительные наблюдения эмиссий источников горения имеют место лишь в нескольких регионах России. Измерительные компании в Московском регионе регулярно проводятся в Институте Физики Атмосферы РАН, благодаря этим усилиям получены уникальные данные по оптическим и микрофизическим характеристикам московского смога в августе 2010 г. Институт оптики атмосферы СО РАН проводит многочисленные проекты по исследованиям оптических и микрофизических свойств субмикронного аэрозоля и сажи в приземном слое атмосферы и в тропосфере Западной Сибири. Для реализации таких работ используются стационарная Аэрозольная станция ИОА (г.Томск) и мобильные аэрозольные станции для экспедиционных приземных, корабельных и самолетных измерений <http://aerosol1.iao.ru>. Важные результаты по исследованиям эмиссии лесов Сибири и химических свойств аэрозолей горения сибирских биомасс получены в Институте химической кинетики и горения СО РАН.

Основная деятельность нашей группы НИИЯФ МГУ нацелена на исследования физико-химических свойств аэрозолей горения, на определение вторичных эффектов влияния эмиссии горения, как наиболее неопределенной компоненты климатических изменений. Более десятка методов были разработаны и применены для всестороннего анализа аэрозолей, эмитированных двигателями транспортных систем, и лабораторных саж. Уникальные эксперименты выполняются для исследования адсорбции, динамики и структуры молекул воды на поверхности аэрозолей горения при тропосферных условиях, установлена корреляция этих характеристик с гидратационной способностью и способностью образовывать льдовыя ядра нуклеации. Было показано, что АГ могут стимулировать гетерогенную нуклеацию льда при значительно более низких пересыщениях паров воды, чем это требуется для гомогенного замерзания природных сульфатных аэрозолей, что приводит к увеличению облачности в верхней тропосфере. Проведено 8 международных проектов.

В настоящее время выполняется проект АГФИР-РФФИ по оценке косвенных эффектов аэрозолей горения природных топлив на климат в глобальной климатической модели (объединенная аэрозольная и транспортная глобальная модель SAM-IMPACT Университета Мичиган, США), обрабатываются физико-химические характеристики московского смога августа 2010 г. и его шлейфа, зарегистрированного греческими коллегами на станции в Афинах, проводятся уникальные измерения реакции эпителиальных клеток легких при осаждении на них частиц сажи.

Публикации:

- Поповичева О.Б., Старик А.М. (обзор) Авиационные сажевые аэрозоли: физико-химические свойства и последствия эмиссии в атмосферу. Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана, 2007, 43, 1-18
- Popovicheva O. (chapter in a book) Combustion-derived carbonaceous aerosols (Soot) in atmosphere: water interaction and climate effects. 2010, in Aerosol - Science and Technology. A Comprehensive Handbook, eds. Agranovski I. Wiley-VCH Verlag , ch.5, 127-157 Поповичева О.Б., Киреева Е.Д., Тимофеев М.А., Шония Н.К., Могильников В.П. Углеродсодержащие аэрозоли в эмиссиях авиации и морского транспорта. Известия РАН. Физика Атмосферы и океана, 2010, 46, 368-375 ■