

## Климатические аспекты «черного углерода».

*В последнее время в зарубежной научной литературе часто упоминаются проблемы мониторинга, исследований, а также возможные меры по сокращению выбросов в атмосферу, образующихся при сжигании ископаемого топлива аэрозолей (или «черного углерода»).*

*В одном из ближайших выпусков журнала «Известия РАН. Физика атмосферы и океана» (№ 4 - 5) будет опубликован обзор специалистов Главной геофизической обсерватории им. Воейкова (ГГО) Росгидромета «Сокращение выбросов короткоживущих атмосферных примесей как альтернативная стратегия замедления изменений климата». Авторы: И.Л. Кароль, А.А. Киселев, Е.Л. Генихович, С.С. Чичерин. Специалисты ГГО подготовили также по данной теме научно-популярную статью И.Л. Кароль, А.А. Киселев «Суэта вокруг сажи», которая будет опубликована в журнале «Природа» №6.*

*По просьбе редакции бюллетеня, один из авторов этих публикаций - И.Л. Кароль согласился рассказать об их содержании и основных выводах.*

### Информация об авторе.

Игорь Леонидович Кароль закончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета в 1949 г. В 1952 г. стал кандидатом физико-математических наук, а в 1970 г. защитил докторскую диссертацию. С 1959 г. возглавлял лабораторию в Институте Экспериментальной Метеорологии (Обнинск), с 1972 г. – заведующий лабораторией ГГО им. А.И. Воейкова (С.-Петербург). Автор 10 монографий и более 200 статей, посвященных проблемам физики и химии атмосферы, теории климата. Участвовал в работе ряда международных комиссий и комитетов Всемирной Метеорологической Организации, Международной Климатической Программы (World Climate Research Program) и др.

Во второй половине 1970-х гг. был руководителем одного из разделов Советско-американского проекта «Состав атмосферы и изменения климата». С 1970-х гг. профессор С.-Петербургского государственного университета, где читает курс теории климата. Под руководством И.Л. Кароля более десятка аспирантов с успехом защитили кандидатские диссертации. Член редколлегии журнала «Известия РАН. Физика атмосферы и океана», в 1990-е гг. член редколлегии «Journal of Geophysical Research». Эксперт - рецензент РФФИ в разделе наук о Земле. Заслуженный деятель науки РФ. Автор ряда научно-популярных статей и брошюр.



И.Л. Кароль

### И.Л. Кароль

«О саже («черном углероде») известно с незапамятных времен, однако в число главных врагов современного климата ее стали относить лишь в последние годы.

Напомним, что наибольший вклад в глобальное потепление вносит углекислый газ  $\text{CO}_2$ , по современным оценкам, его доля составляет 60-70% (МГЭИК, 2007). Поскольку углекислый газ химически пассивен, его «время жизни» в атмосфере достаточно велико – около 100 лет. Как следствие, меры, направленные на сокращение антропогенной эмиссии  $\text{CO}_2$ , даже при высокой их успешности, скажутся лишь через несколько десятилетий. В этой ситуации сегодня активно предлагается идея сокращения выбросов других газов и аэрозолей, чье воздействие на радиационный режим и на климат тоже значительно, но их время пребывания в атмосфере существенно короче (недели, месяцы или годы), а, значит, и отклик климатической системы проявится быстрее (см., напр., Molina et al., 2009). В начале 2012 г. создана Коалиция\* (в составе Бангладеш, Ганы, Канады, Мексики, США и Швеции), объявившая своей целью реализацию этой идеи. В намерения Коалиции входит поддержка глобальных, региональных и национальных усилий для снижения атмосферного содержания таких газов и аэрозолей путем разъяснения их опасности, выдвижения новых национальных инициатив, разработки и продвижения новых технологий для смягчения последствий их влияния на экологию и климат планеты. Во время проходившего в Кэмп-Дэвиде, США, в мае 2012 г. саммита стран «Большой Восьмерки» было принято решение о присоединении всех ее стран-участниц, в том числе, России, к инициативе Коалиции.

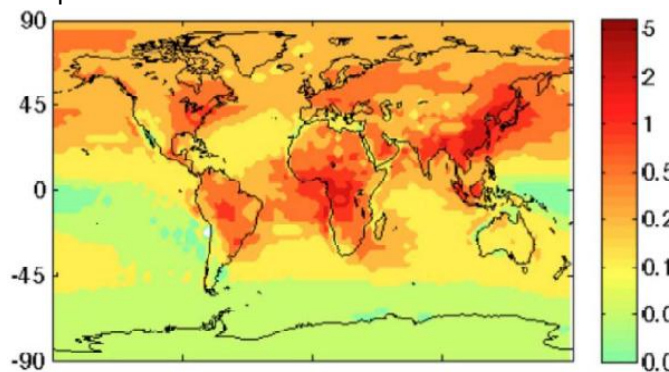
Предполагается, в частности, что благодаря заявленным Коалицией мерам, рост приземной температуры воздуха с настоящего времени не превзойдет  $0,5^{\circ}\text{C}$  в 2050 г. (в то время, как предельно допустимым сегодня считается ее увеличение, начиная с доиндустриального уровня (середины XIX века) на  $2^{\circ}\text{C}$  – при большем, чем на  $2^{\circ}\text{C}$ , росте начнутся необратимые изменения климата). Вышеупомянутые меры заключаются в сокращении выбросов в атмосферу Короткоживущих Климатических Загрязнителей (ККЗ; в оригинале: Short-Lived Climate Pollutants, SLCPs): метана, большой группы гидрофторуглеродов, рассеивающих и сажесодержащих аэрозолей. В этот список также предлагается включить тропосферный озон. Сегодня нет точного критерия, какие компоненты атмосферного воздуха следует отнести к разряду короткоживущих. Пока, «по факту», таковым считается срок не более 10-12 лет, соответствующий «времени жизни» в атмосфере метана.

Короткоживущие климатические загрязнители (ККЗ) атмосферы имеют следующие сходные особенности: первая и основная – среднее время жизни в атмосфере не превосходит нескольких месяцев (не более года). Исключение составляют лишь метан и некоторые гидрофторуглероды, которые относятся скорее к стандартным парниковым газам вместе с  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$ . Из-за небольшого времени жизни пребывания в атмосфере ККЗ не распространяются на значительные расстояния от их источников, и их воздействие на климатический режим носит региональный характер. Однако в некоторых условиях аэрозоли с черным углеродом (нерастворимые изначально) могут переноситься (чаще зимой) на значительные расстояния (из Юго – Восточной Азии в Арктику) и при отсутствии осадков накапливаться в виде так называемой «арктической дымки». Заметным источником черного углерода является также сжигание сухой биомассы растительности тропических саванн Африки и Южной Америки перед сезоном дождей.

**Черный углерод** (black carbon) – являющаяся фактором климатического форсинга, составляющая аэрозольного загрязнения атмосферы, связанная с неполным сгоранием ископаемого топлива, биотоплива и биомассы. Черный углерод поступает в атмосферу в основном в виде сажи, т.е. частиц углерода антропогенного или естественного происхождения в различных связанных формах. Время его пребывания в атмосфере исчисляется несколькими днями или неделями. По оценкам американского специалиста М. Якобсона, 15-30% глобального потепления обусловлено именно эмиссией сажевых частиц (Jacobson, 2002). В воздухе сажа поглощает солнечную энергию и излучает инфракрасную (тепловую) радиацию, а после выпадения на земную поверхность увеличивает количество поглощенной солнечной энергии поверхностью, тем самым способствуя ее дополнительному разогреву. Наиболее критично это в зонах, покрытых снегом и льдом (в полярных областях и горных районах), где ускоряется таяние льдов. Черный углерод попадает в атмосферу в результате неполного окисления углерода в процессе горения органических соединений, в том числе, например, при работе дизельных установок, отоплении помещений углем, дровами, мазутом и пр., а также при эксплуатации печей и плит для приготовления пищи. В ряде стран мира, в том числе, в России, одним из наиболее важных источников поступления черного углерода в атмосферу являются лесные пожары.

Сравнительно мало прямых измерений содержания черного углерода в атмосфере и в выпадениях. Массовые измерения черного углерода производятся лишь на территории США и в меньшей степени в Западной Европе, на территории России функционирует единственная постоянно действующая российско-финско-американская станция в бухте Тикси. Сегодня данные мониторинга еще не отработаны и имеют значительные погрешности.

На рисунке представлена карта географического распределения прямого радиационного воздействия, вызванного черным углеродом в 2010 г. Хорошо заметны регионы основных его эмиссий в мире. Величина радиационного воздействия (парниковый эффект) от черного углерода определяется главным образом путем модельных расчетов и для большинства оценок не превосходит  $0,5...0,9 \text{ Вт/м}^2$ , но по последним оценкам большой группы авторов достигает  $1,1 \text{ Вт/м}^2$  (с огромным разбросом  $0,17 - 2,1 \text{ Вт/м}^2$ ), что соответствует 2-му месту в антропогенном парниковом эффекте – после  $\text{CO}_2$  (Bond et al., 2013).



Модельное географическое распределение прямого радиационного форсинга ( $\text{Вт/м}^2$ ), вызванного эмиссией черного углерода (Bond et al., 2011).

Загрязнение атмосферы короткоживущими газами и аэрозолями оказывает опасное влияние на природу и человека, одновременно сказываясь на изменениях климата. Таким образом, всестороннее изучение ККЗ служит сразу двум целям: санитарной охране воздушного бассейна и противоборствует нежелательным изменениям климата. В результате такого изучения вырабатываются рекомендации и намечаются меры для достижения упомянутых выше целей. Однако каждая из этих целей имеет свою специфику. Основное их различие заключается в разнице пространственных масштабов: климатические оценки строятся для атмосферных элементов, осредненных по регионам среднего и крупного масштабов, в то время как исследования загрязнения воздуха ориентированы, главным образом, на маломасштабные территории с большим скоплением людей (города и промышленные зоны). Различаются также и конечные цели исследований: оценка изменений климатических элементов (температуры и динамики воздушных масс, осадков и пр.), с одной стороны, выявление и мониторинг газовых и аэрозольных токсикантов и сравнение их концентраций с санитарными нормами, с другой.

### **Из всего вышесказанного, очевидно, можно сделать следующие выводы:**

1. Мониторинг ККЗ и модельные исследования показывают, что их эмиссия в атмосферу создает предпосылки для эскалации потепления климата и ухудшает экологическую обстановку вблизи очагов загрязнения.

2. Степень воздействия на климат рассмотренных ККЗ неодинакова. Кроме того, это воздействие существенно зависит от географического расположения региона, особенностей метеорологической обстановки над ним, сезонных вариаций, особенностей хозяйствования в нем. Остается открытым главный вопрос: позволят ли предпринятые меры по сокращению выбросов ККЗ достигнуть существенного прогресса в снижении темпов глобального потепления.

3. Существует несколько климатических индексов, характеризующих отклик климатической системы на отдельный вид загрязнения. Как правило, величины этих индексов определяются с помощью модельных расчетов. Анализ приведенных оценок свидетельствует об отсутствии единого подхода в методиках вычисления климатических индексов. Также отмечается отсутствие на сегодняшний день универсального индекса, способного объективно отразить вклад каждого из достаточно разнородных (газовых и аэрозольных) ККЗ. Таким образом, необходимы новые идеи для получения критерия, соизмеряющего воздействие на климат отдельных его загрязнителей.

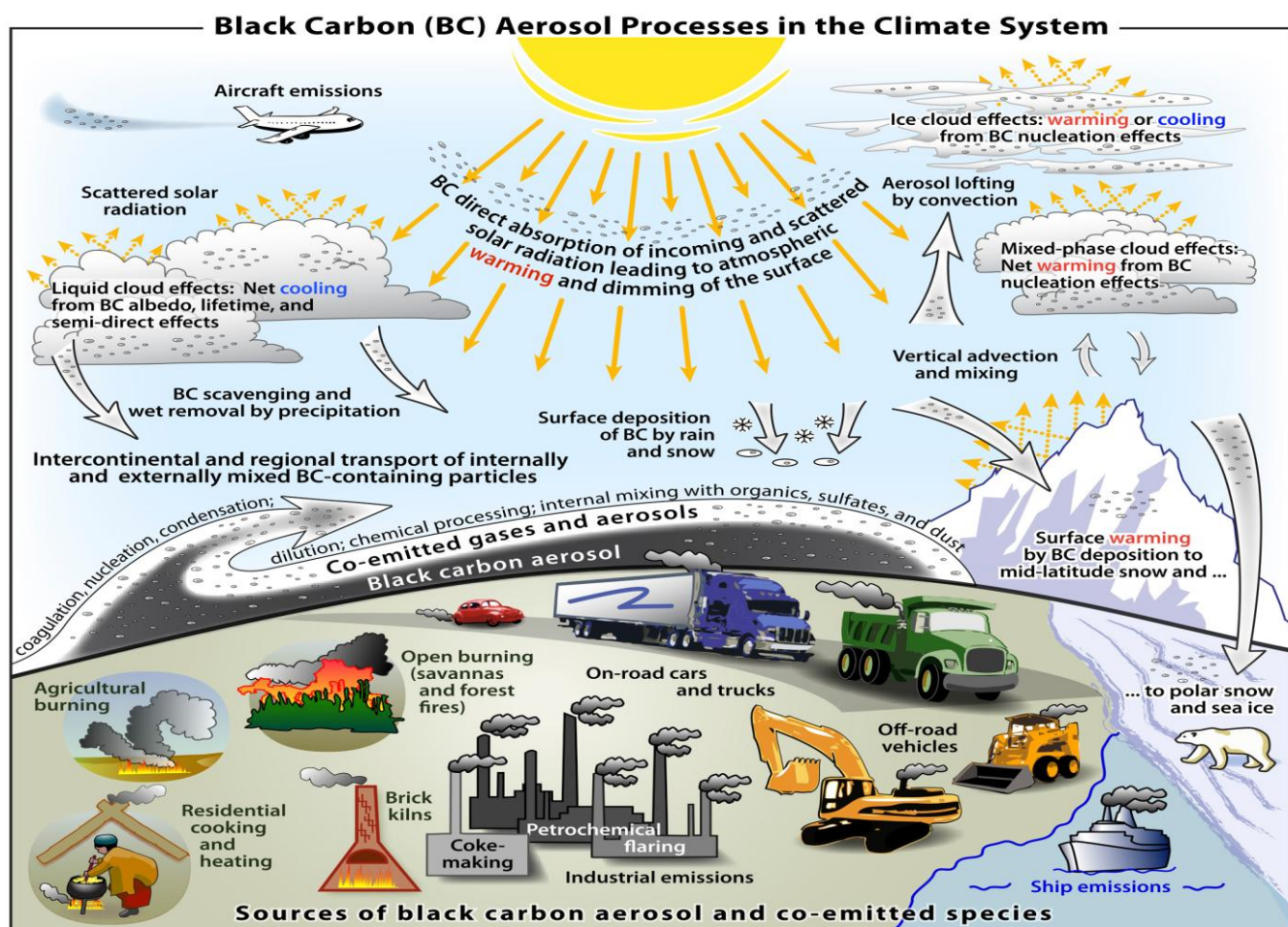
4. Основная доля модельных исследований приходится на оценки, сделанные с помощью глобальных климатических моделей, которые, ввиду их сложности, часто не в состоянии достаточно подробно описать локальные эффекты, производимые загрязнителями с коротким «временем жизни». Поэтому, вероятно, необходимо для этих целей более интенсивно использовать региональные климатические модели, способные увеличить детализацию изучаемых механизмов воздействия на климат.

5. Короткое «время жизни» ряда ККЗ, в первую очередь, черного углерода, порождает высокую изменчивость его концентрации в атмосфере, а также связанного с ним альbedo снежных и ледяных поверхностей Арктики и горных областей Земли. В связи с этим, важно наладить регулярный мониторинг такой изменчивости в реальном времени и учитывать ее в модельных вычислениях.

6. Сегодня существуют лишь очень грубые оценки как стоимости мер, выдвигаемых ради сокращения эмиссии ККЗ, так и их экономической выгоды. По мнению Bond, Sun (2005), «смягчение парникового эффекта, обусловленное мерами по сокращению выбросов черного углерода в атмосферу, может оказаться более дорогостоящим, по сравнению с мерами, направленными на уменьшение эмиссии CO<sub>2</sub>. Вряд ли можно рассчитывать на скорейшее улучшение таких оценок, но усилия, прилагаемые в этом направлении, безусловно, необходимы».

### **Основные источники эмиссии «черного углерода» и процессы, контролирующие его распределение в атмосфере и роль в климатической системе**

*(Bond et al., 2013, American Geophysical Union)*



## Литература

- МГЭИК, 4-й Оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата, 2007; Обобщенное резюме на русском языке [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_ru.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf)
- Bond T., Sun K. Can reducing black carbon emissions counteract global warming? *Environ. Sci. Technol.*, v. 39, p. 5921 – 5926, 2005.
- Bond T., Zarzycki C., Flanner M., Koch D., Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 11, pp. 1505 – 1525, 2011.
- Bond T. et al., Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J. Geophys. Res.*, 2013. [http://www.agu.org/news/press/pr\\_archives/2013/2013-01.shtml](http://www.agu.org/news/press/pr_archives/2013/2013-01.shtml)
- Jacobson, M., Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation, Cambridge University Press, 339 p., 2002.
- Molina M., Zaelke D., Sarma K., Andersen A.O., Ramanathan V., Kaniaru D., Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO<sub>2</sub> emissions. *Proceedings of National Academy of Sciences*, v. 106, No. 49, p. 20616-20621, 2009.

**Редакция бюллетеня благодарит И.Л.Кароля за подготовку данного материала.**

## Дополнительно:

- «Аэрозоли горения и климат» - интервью с ведущим научным сотрудником НИИЯФ МГУ им.Ломоносова к.ф.-м.н О.Б.Поповичевой («Изменение климата»), №32, март 2012 г. [http://global-climate-change.ru/download/byulletenyo/izmenenie\\_klimata\\_N32\\_March2012\\_new.pdf](http://global-climate-change.ru/download/byulletenyo/izmenenie_klimata_N32_March2012_new.pdf)
- \* - Международная коалиция по исследованию и снижению выбросов короткоживущих климатических загрязнителей <http://www.unep.org/ccac/About/tabid/101649/Default.aspx> ■