

# Воздействие краткосрочных загрязнителей на климат Арктики

П. К. Куинн, Т. С. Бейтс, Э. Баум, Т. Бонд, Дж. Ф. Беркхарт,  
А. М. Фьоре, М. Флэннер, Т. Дж. Гарретт, Д. Кох, Дж. МакКоннелл,  
Д. Шинделл, А. Столь

## Ссылки при упоминаниях:

АМАП / Куинн и др. «Воздействие краткосрочных загрязнителей на климат Арктики». Технический доклад АМАП № 1, 2008 г.. Программа арктического мониторинга и оценки, АМАП. Осло, Норвегия.

AMAP / Quinn et al., 2008. The Impact of Short-Lived Pollutants on Arctic Climate. AMAP Technical Report No. 1 (2008), Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.

*(Электронная копия документа доступна по адресу [www.amap.no](http://www.amap.no))*

## Авторы:

П. К. Куинн<sup>1</sup>, Т. С. Бейтс<sup>1</sup>, Э. Баум<sup>2</sup>, Т. Бонд<sup>3</sup>, Дж. Ф. Беркхарт<sup>4</sup>, А. М. Фьоре<sup>5</sup>, М. Флэннер<sup>6</sup>, Т. Дж. Гарретт<sup>7</sup>, Д. Кох<sup>8</sup>, Дж. МакКоннелл<sup>9</sup>, Д. Шинделл<sup>8</sup>, А. Столь<sup>4</sup>

(P.K. Quinn, T.S. Bates, E. Baum, T. Bond, J.F. Burkhart, A.M. Fiore, M. Flanner, T.J. Garrett, D. Koch, J. McConnell, D. Shindell, and A. Stohl)

<sup>1</sup>Лаборатория морских тихоокеанских экологических исследований Национального управления по океану и атмосфере США, г. Сиэтл, штат Вашингтон, США (NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, WA, USA)

<sup>2</sup>Рабочая группа по чистому воздуху, г. Бостон, штат Массачусетс, США (Clean Air Task Force, Boston, MA, USA)

<sup>3</sup>Университет штата Иллинойс

<sup>4</sup>Норвежский институт исследований воздуха (Norsk Institutt for Luftforskning, NILU), г. Шеллер (Kjeller), Норвегия

<sup>5</sup>Лаборатория геофизической гидродинамики Национального управления по океану и атмосфере США, Университет Принстон, штат Нью-Джерси, США (NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, NJ, USA)

<sup>6</sup>Программа специальных исследований, Национальный центр атмосферных исследований, г. Боулдер, штат Колорадо, США (Advanced Study Program, NCAR, Boulder, CO, USA)

<sup>7</sup>Университет штата Юта, г. Солт-Лейк-Сити, штат Юта, США

<sup>8</sup>Институт космических исследований Годдарда Национального управления по авиации и исследованию космического пространства США, г. Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США (NASA Goddard Institute for Space Sciences, New York, NY, USA)

<sup>9</sup>Институт исследований пустыни (Desert Research Institute)

Программа арктического мониторинга и оценки (АМАП) была учреждена в июне 1991 года восемью странами арктического региона – Канадой, Данией, Финляндией, Исландией, Норвегией, Россией, Швецией и Соединенными Штатами – с целью выполнения отдельных задач Стратегии охраны окружающей среды Арктики (СООСА, Arctic Environmental Protection Strategy). Сегодня АМАП является одной из шести рабочих групп Арктического совета, членами которого являются восемь упомянутых стран арктического региона, шесть Постоянных участников Арктического совета (организации коренных народов Арктики), а также страны-наблюдатели и другие организации.

Целью работы АМАП является «обеспечение надежной и исчерпывающей информации о состоянии окружающей среды Арктики и об угрозах ее благополучию, а также разработка научных рекомендаций по тем шагам, которые необходимо предпринять для поддержки правительств арктических государств в тех усилиях, которые они прилагают к принятию коррективных и превентивных мер по сокращению негативного воздействия загрязнителей и изменений климата».

АМАП с регулярной периодичностью выпускает оценочные доклады, предметом исследования которых является ряд проблем в области загрязнения Арктики и изменений климата, включая воздействие этих факторов на здоровье населения арктического региона. Оценки, вырабатываемые АМАП, представляются министрам-членам Арктического совета в форме докладов «О состоянии окружающей среды Арктики», на основе которых формируется стратегия шагов, необходимых для защиты Арктики и ее обитателей.

Серия технических докладов АМАП публикуется в рамках программы с целью сделать общедоступными результаты научной работы, ресурсы которой привлекаются в ходе составления оценок АМАП. Эти результаты, а также любые мнения, приведенные в технических докладах, находятся в сфере ответственности ученых и экспертов, задействованных в подготовке докладов, и не являются предметом согласования ни со стороны рабочей группы АМАП, ни со стороны Арктического совета.

Секретариат АМАП располагается в г. Осло, Норвегия. Для получения информации относительно программы АМАП либо размещения заказов на приобретение докладов, просим обращаться в Секретариат АМАП. Адрес страницы АМАП в Интернет – [www.amap.no](http://www.amap.no).

--

# 1. Введение

За последние 100 лет темпы повышения температуры в Арктике почти вдвое превысили среднюю скорость потепления на планете (МГЭИК, 2007 г.). С 1954 по 2003 гг. среднегодовая температура воздуха в приземном слое атмосферы Арктики повысилась с 2°C до 3°C в Аляске и Сибири и почти до 4°C в зимний период (АСИА, 2004 г.). Потепление в Арктике сопровождается более ранним началом весеннего таяния, увеличивающейся продолжительностью периодов таяния, а также изменениями в массовом балансе ледниковых покровов Гренландии (Строув и др., 2006 г.; Зуолли и др., 2002 г.). Помимо того, с 1979 по 2006 гг. каждый месяц отмечалось сокращение поверхности ледовых покровов арктических морей (Серрезе и др., 2007 г.). В течение периода таяния 2007 г. общая площадь поверхности морского льда Арктики сократилась до самых низких величин, когда-либо отмечавшихся со времени начала спутникового наблюдения в 1979 г., впервые за всю известную историю полностью открыв для навигации Северо-Западный проход Северного морского пути (NSIDC, 2007 г.). Вторым по масштабам сокращения морских льдов в Арктике стал рекорд 2008 г. (см. Рис. 1), сопровождавшийся освобождением ото льда Северного морского пути (NSIDC, 2008 г., <http://nsidc.org/arcticseaicenews/index.html>).



Рис. 1. Ежедневная динамика протяженности морского льда. Голубая кривая отражает динамику масштабов морского льда за 2008 г., серая – среднюю протяженность за период с 1979 по 2000 гг., зеленая – динамику за 2007 г. (Национальный центр исследований снега и льда).

Среди эффектов воздействия на климат потери льда в Арктике – сокращение отражательной способности поверхности Земли, или «альбедо», т.н. феномен «положительной обратной связи», который ведет к дальнейшему потеплению. Весной, когда солнце поднимается, поднимается и температура воздуха, и снег на поверхности начинает таять, в результате чего обнажается поверхность морского льда, а при дальнейшем таянии – и океанской воды. Оставшись без ледовой защиты, темные участки океанских вод теряют отражательную способность и начинают поглощать больше солнечной энергии. Таким образом, происходит дальнейшее потепление. Этот эффект – положительная обратная связь между снегом и альбедо – является одной из причин, по которым Арктика чрезвычайно чувствительна к изменениям температуры. Раннее начало весеннего таяния, отмечавшееся в последние годы, представляет собой особо тревожный признак, т.к. весна – сезон максимального проявления эффекта положительной обратной связи между величиной снега и альбедо (напр., Холл и Цюй, 2006 г.).

Временные сроки, когда можно было бы ожидать окончательного разрушения ледникового щита Гренландии и перехода к регулярному сезонному освобождению Арктики ото льдов, определить крайне трудно, так же как и оценить масштаб воздействия этих процессов на региональном и глобальном уровне. Однако уже очевидны те проявления в экологии Арктики, которые явно указывают на значительную и резкую реакцию арктической природы на происходящие изменения. Например, палеоэкологические данные, собираемые по всему арктическому региону, показывают корреляцию между драматическими изменениями в диатомовых водорослях и других индикаторах биологического состояния и существующими условиями потепления и сокращающихся ледовых покровов (Смол и др., 2005 г.). Признаки быстрых изменений проявляются также и в приполярной растительности, включая распространение областей, занятых кустарниками и деревьями (Чапин и др., 2005 г.). Более раннее начало таяния материкового снега в Арктике и в горных районах тундры будет иметь прямые и значительные последствия для первичной продуктивности растений. Двухнедельное увеличение продолжительности майского сезона роста (когда происходит максимальное глобальное поступление солнечного излучения) может потенциально выразиться в

повышении продуктивности растений на 15-25% (в то время как такое же увеличение продолжительности сезона в сентябре-октябре не несет подобного эффекта, т.к. качество поступающего света недостаточно для фотосинтеза) (Бьорк и Молау, 2007 г.). Однако основная часть распространяющейся растительной биомассы тундры будет приходиться на инвазивные бореальные виды (напр., береза, ива, черника, некоторые травянистые растения), которые будут вытеснять аборигенные виды Арктики, живущие только в определенных экологических условиях (Зюндквист и др., 2008 г.). Такой сдвиг в биоразнообразии растительной жизни произведет мгновенный негативный эффект на разнообразие животных видов, что, в свою очередь, подразумевает серьезные изменения в образе жизни коренных народов Арктики и отразится на основных видах деятельности, распространенных в регионе, таких как оленеводство и туризм. Происходящее буйное разрастание кустарников уже отмечается в арктических и субарктических районах Аляски и Скандинавии (Уокер и др., 2006 г.). Высока вероятность того, что сокращение морских ледовых покровов окажется губительным также и для популяций северных медведей, тюленей, чье выживание находится в прямой зависимости от ледовых условий, а также для населения, добывающего этих животных для пропитания (АСИА, 2004 г.). Процессы потепления и таяния в Арктике скажутся и на благополучии всей планеты (АСИА, 2004 г.), поскольку таяние арктических глетчеров является одним из факторов, способствующих повышению глобального уровня моря.

Потепление в Арктике является, в первую очередь, одним из проявлений глобального потепления, и потому меры, принимаемые по снижению среднего уровня потепления в глобальном масштабе, дадут свой эффект и в Арктике, обуздав потепление и скорость таяния в этих регионах (МГЭИК, 2007 г.). Сокращение атмосферных выбросов углекислого газа является необходимой основой для любых сколько-нибудь конструктивных усилий по укрощению процессов изменения климата. Но даже если в отношении выбросов углекислого газа уже сейчас будут приняты срочные и жесткие меры, эффект от таких сокращений, – учитывая значительную продолжительность жизни углекислого газа в атмосфере, – может не наступить вовремя, и сдержать активное таяние в Арктике не удастся. Таким образом, лучшей стратегией для достижения цели уменьшения продолжительности полярного сезона таяния, – в частности, предотвращения раннего наступления весеннего таяния, – должно стать сокращение загрязнителей краткосрочного действия, особенно таких, которые приводят к поверхностному воздействию, способному «включить» региональные климатические ответные реакции, входящие в эффект обратной связи процесса таяния морского льда. Примерами такого воздействия могут служить выбросы тропосферных аэрозолей, которые влияют на потоки солнечного света в Арктике (напр., Гарретт и Чжао, 2006 г.; Любин и Фогельманн, 2006 г.), осаждение аэрозолей, содержащих черный углерод, которое приводит к повышенной абсорбции солнечного излучения на поверхности Земли (напр., Уоррен и Уискомб, 1980 г., Флэннер и др., 2007 г.), а также скопление тропосферного озона, которое способствует сезонным процессам потепления в Арктике (см. Рис. 2) (Шинделл и др., 2006 г.). Меры, которые можно предпринять в отношении этих краткосрочных факторов (тропосферные аэрозоли, тропосферный озон и метан), обладают сильным преимуществом в том смысле, что сокращение содержания этих загрязнителей в атмосфере даст гораздо более оперативный эффект, чем сокращение долгоживущих парниковых газов.

Высокая степень приближенности в данных, сопутствующая процессу оценки параметров воздействия этих загрязнителей, а также температурных реакций, возникающих на это воздействие, затрудняет формулирование исчерпывающих ответов на вопросы, связанные с последствиями такого загрязнения и стратегиями его минимизации. Тем не менее, мы можем описать механизмы воздействия краткосрочных загрязнителей на климат Арктики, сфокусировать внимание на тех проблемах, которые препятствуют точной оценке взаимосвязи между этим воздействием и вызываемыми им температурными колебаниями, а также разработке эффективных митигационных стратегий, и подготовить предварительные данные по воздействию краткосрочных загрязнителей и температурным реакциям в Арктике, основанные на осредненных оценках посезонной динамики. Кроме того, мы можем наметить в общих чертах возможности по смягчению негативных климатических процессов в Арктике в ближайшей перспективе и предложить рекомендации по дальнейшим исследованиям в тех областях, где недостаток данных вызывает неопределенность, мешающую точно оценить воздействие краткосрочных загрязнителей и вызываемые ими температурные изменения.

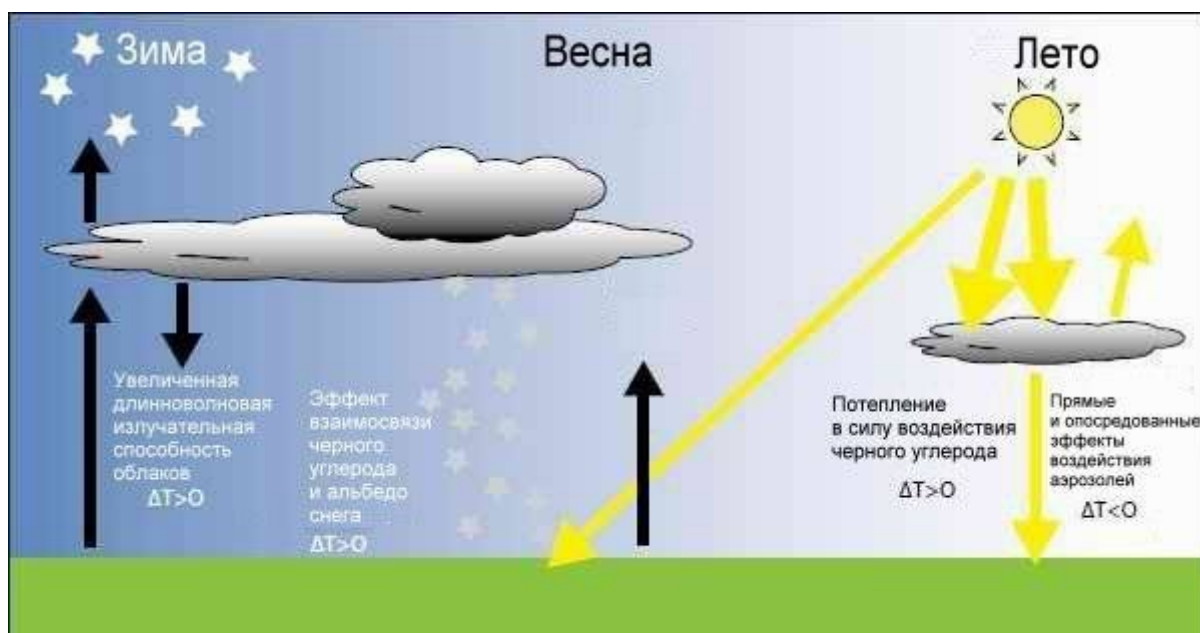


Рис. 2. Механизмы воздействия краткосрочных загрязнителей на климат Арктики.  $\Delta T$  указывает на температурную реакцию поверхности Земли (Куинн и др., 2008 г.).

## 2. Загрязнители краткосрочного действия и их влияние на климат Арктики

### 2.1 Пути попадания загрязнителей в атмосферу Арктики

Пласты постоянной потенциальной температуры формируют над Арктикой своеобразный закрытый купол, изолирующий нижние слои ее тропосферы от остальных слоев атмосферы (Клонецки и др., 2003 г., Столь, 2006 г.). В зимний период протяженность этого купола, также известного как арктический фронт, может простираться глубоко на юг, вплоть до 40° северной широты, закрывая собой части Северной Европы и Азии (см. Рис. 3). Летом же масштабы арктического фронта намного меньше и ограничены более высокими широтами.

Для разработки стратегий смягчения эффектов арктического потепления, вызванных краткосрочными загрязнителями, необходимо определить относительную значимость выбросов, переносимых в атмосферу Арктики из различных регионов, для уровней содержания этих загрязнителей в Арктике. Столь в своем исследовании (Столь, 2006 г.) представил климатологическую модель перемещения загрязнителей в арктические регионы, разработанную им на основе модели рассеивания частиц Лагранжа, ветров, рассчитанных по данным Европейского Центра среднесрочных метеорологических прогнозов (European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF), и параметризованных турбулентном и конвективном переносе. В ходе пяти с половиной лет выполнения модели, Столю удалось выявить три основных типа атмосферного переноса в Арктике:

- 1) Быстрый (в течение четырех или менее дней) низкоуровневый перенос в Арктику с подъемом у арктического фронта. Такой тип перемещения возможен при переносе из населенных европейских районов, расположенных достаточно высоко к северу, чтобы оказаться севернее полярного фронта. Этот же паттерн характерен для переноса в Арктику из районов лесных пожаров в северных широтах (Столь и др., 2006 г.). Атмосферный подъем и последующее выпадение осадков при этом паттерне происходит выше 70° северной широты, и результатом такого маршрута перемещения может стать осаждение твердых частиц на поверхности арктических территорий.
- 2) Низкоуровневый перенос холодных воздушных масс, которые охлаждаются еще больше, продвигаясь над покрытыми снегом поверхностями внутрь полярного купола (10-15 дней). Такой тип перемещения возможен из районов-источников загрязнения, расположенных в Европе и на высоких широтах в Азии, т.к. маршрут переноса включает покрытые снегом территории северной Сибири. Этот паттерн не наблюдается в летний период, поскольку летом поверхностная температура в евразийских регионах выше.
- 3) Перенос с подъемом к югу от Арктики и вблизи района-источника загрязнения, сопровождаемый перемещением на большой высоте и спуском в полярный купол под действием радиационного охлаждения.

Столь в своей работе (Столь, 2006 г.) указывает, что для перемещения из Северной Америки и Восточной Азии последний тип переноса – единственный частый паттерн. Учитывая относительно продолжительное время, которое требуется для переноса частиц из районов-загрязнителей, находящихся в Северной Америке и Восточной Азии, – по сравнению со временем пребывания аэрозольных частиц в атмосфере и их потенциальным выносом в связи с аккумуляцией влаги, – Столь приходит к выводу, что выбросы из европейских районов-загрязнителей играют гораздо более ощутимую роль в повышении уровня загрязнения арктических поверхностей. Вместе с тем, как показывает климатологическая модель (Столь, 2006 г.), масштаб загрязнения, исходящего из европейских районов, снижается на более низких высотах, тогда как загрязнения, идущие из районов, расположенных в Южной Азии, растут с увеличением высоты перемещения.

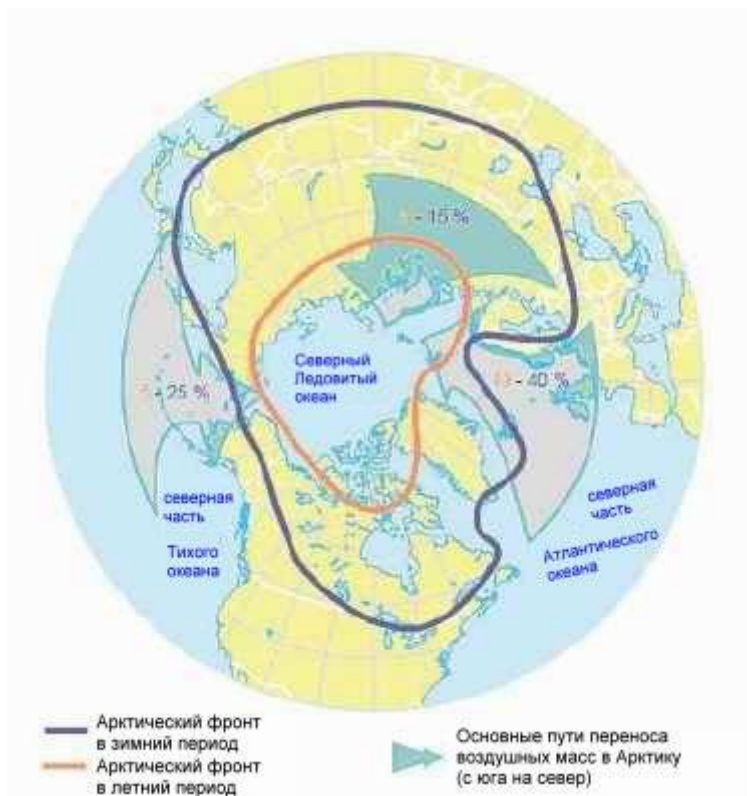


Рис. 3. Среднее расположение арктической воздушной массы в зимний период (январь) и летний период (июль) (АМАП, 2008 г.).

Относительная значимость масштабов выбросов, идущих из различных районов-загрязнителей, в оценке уровней загрязнения в Арктике стала также предметом изучения в исследовании, проведенном в рамках работы Целевой рабочей группы по переносу загрязнения воздуха в Северном полушарии (Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution, HTAP) и основанном на экспериментах с применением нескольких моделей (Шинделл и др., 2008 г.). Были рассмотрены следующие районы-источники загрязнения: Европа, Северная Америка, Восточная Азия и Южная Азия (см. Рис. 4). Северная Азия (Россия) не была включена в регионы изучения, однако чувствительность арктического климата к загрязнениям, исходящим из этого региона, представляется сравнимой со степенью уязвимости к выбросам из Европы, учитывая близость этих регионов друг к другу и похожие метеорологические условия.

Исходя из данных инвентаризации различных выбросов, использованных в экспериментах для каждой модели, а также из расчетов уровня чувствительности арктического климата к различным загрязнениям (соотношение концентраций компонентов смеси на единицу выбросов), авторы исследования обнаружили, что источником самой большой доли загрязнений в общей среднегодовой массе отложений сульфатных аэрозолей и черного углерода на арктических поверхностях является Европа (см. Рис. 5). Кроме того, именно Европа «поставляет» преимущественную долю сезонных концентраций осаждающихся сульфатов и черного углерода. Другими словами, основные поверхностные загрязнения в каждый сезон года – зимой, весной, летом и осенью – исходят из европейских регионов. В верхних слоях тропосферы (250 гПа) большая часть концентраций сульфатов и черного углерода оказалась загрязнениями, переносимыми из Азии (Южной и Восточной), и в среднегодовом, и в посезонном исчислении. Однако в средних слоях тропосферы (500 гПа) расклад по концентрациям различных загрязнителей и их источников не столь однозначен. В случае сульфатных аэрозолей, основная доля выбросов исходила из Европы, в среднем за год и в каждое отдельное время года. Поступающие из Азии (Южной и Восточной) выбросы черного углерода в весенний период составляли основную часть концентраций в средних слоях атмосферы, зимой и осенью были сравнимы с количеством выбросов из Европы, а летом несколько уступали по масштабам выбросам из европейских источников. Содержание озона в арктической атмосфере оказалось по результатам работы моделей менее зависимым от уровня высоты и потому не отличалось большими вариациями в региональной чувствительности. Было определено, что наибольшее воздействие на содержание озона в Арктике на всех уровнях имеют выбросы окислов азота из Северной Америки.



Рис. 4. Четыре региона-источника загрязнения (отмечены штриховкой), рассмотренные в исследовании Целевой рабочей группы по переносу загрязнения воздуха в Северном полушарии (Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution, НТАР) (Шинделл и др., 2008 г.).

Как было показано в обоих исследованиях (Столь, 2006 г. и Шинделл и др., 2008 г.), выбросы из Европы вносят основной вклад в концентрации сульфатных аэрозолей и черного углерода в поверхностных загрязнениях в Арктике. Также в обоих работах был сделан вывод, что на уровень загрязнений в более высоких слоях тропосферы воздействуют выбросы из Азии, – более того, по оценкам, представленным в исследовании Шинделла (Шинделл и др., 2008 г.), выбросам из Азии отводится намного более значимая роль, особенно в случае концентраций черного углерода. Такую разницу нельзя объяснить различиями в выбросах, т.к. в обоих исследованиях были использованы близкие данные инвентаризации загрязнений. По мнению Шинделла и соавторов (Шинделл и др., 2008 г.), расхождение может быть результатом фундаментальных различий в методах моделирования, примененных в исследованиях. Так или иначе, обе работы демонстрируют, что выбросы из Европы приводят к высокому содержанию сульфатных аэрозолей и черного углерода в поверхностных загрязнениях, доля выбросов из Азии увеличивается по мере увеличения высоты в тропосфере, а в концентрациях озона на всех уровнях тропосферы Арктики основную роль играют выбросы из Северной Америки.

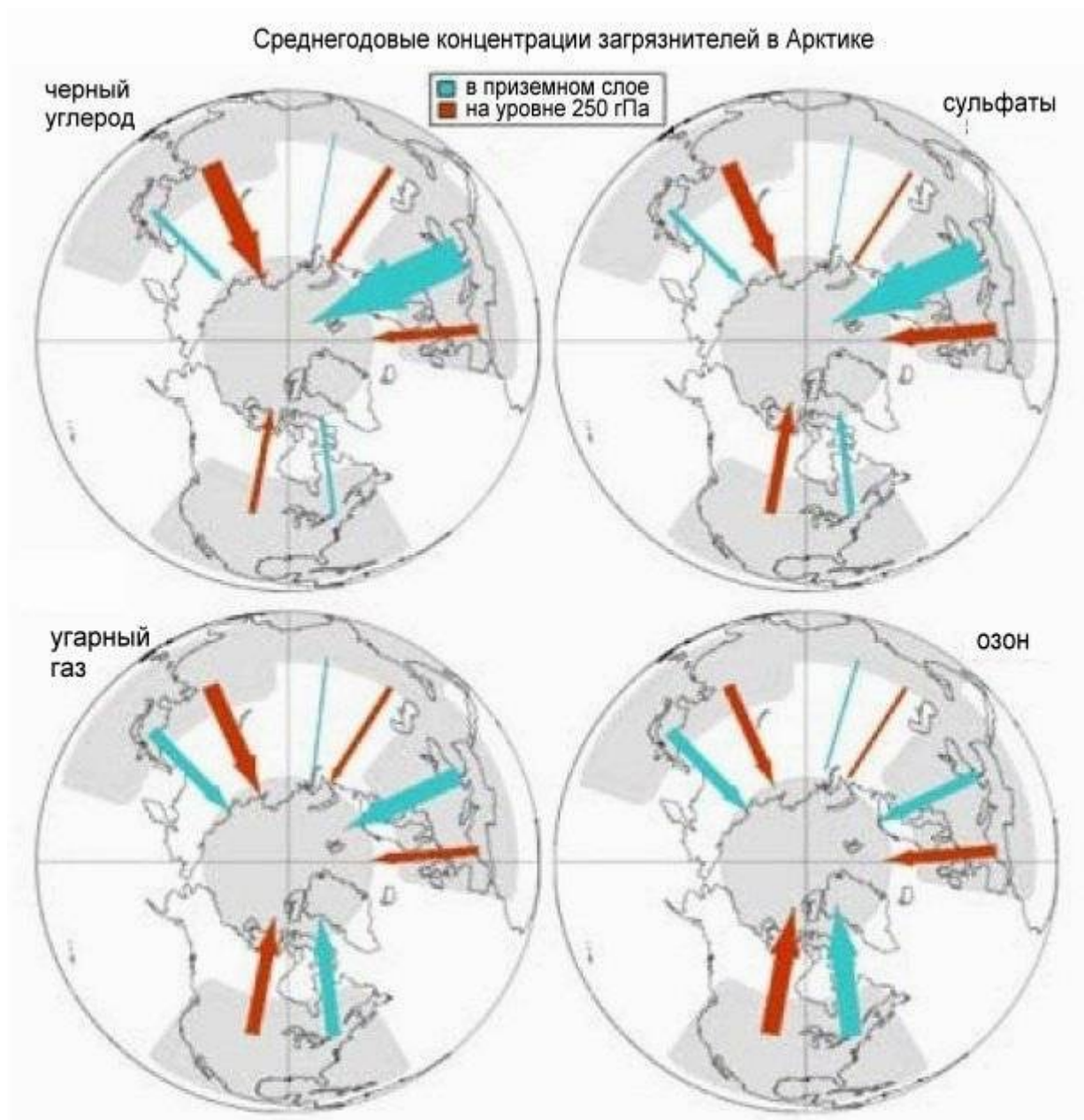


Рис 5. Относительная значимость отдельных регионов-источников загрязнений в общей картине среднегодовых концентраций различных загрязнителей в Арктике, как в приземном содержании, так и в высоких слоях тропосферы (250 гПа). Значения получены путем моделирования реакции на 20-процентное сокращение в антропогенных выбросах исходных продуктов из каждого региона (с использованием данных по окислам азота в вычислениях значений по озону). Ширина стрелок отражает величину осредненной по результатам работы использованных моделей процентной доли загрязнений из каждого региона в общем переносе загрязнений из указанных четырех регионов-источников (Шинделл и др., 2008 г.).

## 2.2 Метан

**Источники и динамика загрязнений.** За период, прошедший со времени индустриальной революции, активный рост в различных сферах человеческой деятельности привел к более чем двукратному увеличению концентраций метана в атмосфере Земли (Уэбблс и Хейхоу, 2002 г.). Данные, полученные из исследований ледяных кернов, в совокупности с атмосферными измерениями показывают, что сегодняшний уровень содержания метана в атмосфере – примерно 1770 частей на миллиард – превышает все имеющиеся показатели за последние 650 тысяч лет (Пети и др., 1999 г., Спани и др., 2005 г.). За несколько последних десятилетий темпы увеличения содержания метана сократились, и сегодняшние наблюдения показывают, что либо уровень метана постепенно закрепляется на одной отметке, либо начинает, после краткого спада в начале 1990-х гг., вновь повышаться (см. Рис. 6) (Длугокенски и др., 2003 г.). В то же время темпы роста содержания метана становятся более изменчивыми. В будущем следует ожидать увеличения выбросов метана вследствие более активного использования ископаемого топлива и также, возможно, по причине изменений, происходящих в водно-болотистых областях северных широт из-за повышения температуры

(Брювайлер и Мэттьюс, 2007 г.).

Антропогенными источниками содержания метана, – на них приходится примерно две трети всего выбрасываемого в атмосферу Земли метана, – являются добыча и использование угля и газа, возделывание риса, твердые отходы животноводства, ликвидация отходов, сжигание биомассы, захоронение отходов на полигонах и интестинальная ферментация (напр., Кирхгесснер, 2000 г., Хуанг и др., 1998 г., Харпер и др., 1999 г., Хувелинг и др., 1999 г., Джонсон и др., 2000 г.).

Основным большим источником выбросов метана являются природные заболоченные местности (МГЭИК, 2001 г.). На болотистые угодья, расположенные к северу от 60° северной широты, приходится до 13% всех глобальных стоков природного метана (Као и др., 1998 г.). Экосистемы приполярных болотных земель перерабатывают часть углерода, который они путем фотосинтеза поглощают в виде углекислого газа из атмосферы, в метан. Измерения, сделанные за последние десять лет в субарктических и арктических широтах показали, что выбросы метана из этих районов растут вследствие повышения температуры и, как результат, исчезновения вечной мерзлоты и увеличивающейся сырости почв (напр., Накано и др., 2000 г., Зимов и др., 2006 г.). В одном из районов субарктической Швеции изменения, затронувшие вечную мерзлоту и растительность, привели в период между 1970 и 2000 гг. к увеличению выбросов метана на 20-70% (Кристенсен и др., 2004 г.). В арктических районах сплошной вечной мерзлоты потепление вызвало деградацию вечной мерзлоты и увеличение размеров и числа талых озер. По оценкам, именно распространение талых озер стало причиной 58-процентного повышения уровня выбросов метана из термокарстовых озер в районе р. Колыма в период между 1974 и 2000 гг. – с 2,4 до 3,8 Тг (Уолтер и др., 2006 г.). Дальнейшее потепление в Сибири может привести к выбросам тысяч тераграмм метана из тех 500 гигатонн лабильного органического углерода, который на сегодняшний день накоплен в зонах вечной мерзлоты (для сравнения, содержание метана в атмосфере сейчас находится на уровне 5 тысяч тераграмм)

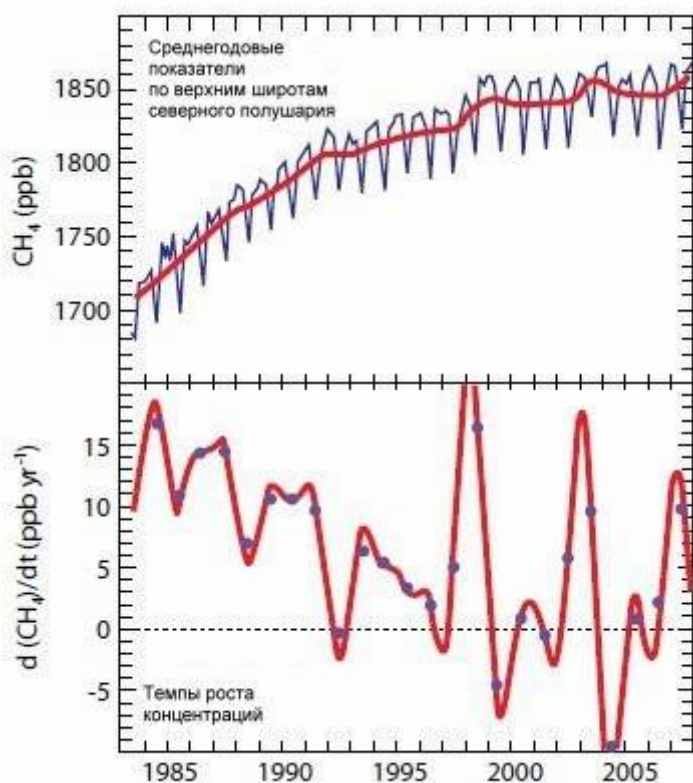


Рис. 6. Средние показатели концентрации метана в верхних широтах северного полушария (от 53° до 90° северной широты), по данным, полученным путем отбора проб воздуха станциями Национального управления по океану и атмосфере США (NOAA) с 1983 г.. На графиках отражены общая динамика по верхним широтам северного полушария и осредненные недельные показатели вне учета сезонных вариаций (вверху) и производная по времени с указанием доверительного интервала ( $\pm 1\sigma$ , пунктирная линия) и годовое повышение концентраций (внизу) (материал предоставлен Э. Длугокенски, NOAA/ESRL (Лаборатория изучения геофизических систем)).

**Радиационное воздействие.** Обладая продолжительностью жизни около девяти лет (Принн и др., 1995 г.), метан является менее долгоживущим агентом воздействия нежели углекислый газ, но тем не менее, довольно широко и ровно распространен в глобальной атмосфере. Метан находится на втором после углекислого газа месте по масштабам антропогенного радиационного воздействия со времени доиндустриальной эпохи, а на молекулярном уровне является даже еще более действенным парниковым газом, чем углекислый газ (МГЭИК, 2001 г.). Метан оказывает радиационное воздействие непосредственным образом – путем поглощения длинноволнового излучения, а также опосредованно – через ряд химических реакций, которые

ведут к образованию других радиационно-значимых газов (Уэбблс и др., 2002 г.). В последнем случае преимущественное значение имеет тропосферный озон – также один из парниковых газов с короткой продолжительностью жизни, который образовывается через реакцию окисления метана, инициируемую гидроксильными радикалами (ОН) при наличии окислов азота ( $\text{NO}_x$ ) и солнечного света. Радиационное воздействие в силу глобального присутствия метана в атмосфере способствует потеплению в Арктике, так как в климатической системе осуществляется перенос тепла из отдаленных регионов в арктические. В самой же Арктике процесс потепления усиливается из-за положительной обратной связи снега и альбедо, описанной выше.

## 2.3 Тропосферный озон

**Источники и динамика загрязнений.** И непосредственные наблюдения, и данные экспериментов с моделированием доказывают, что концентрации тропосферного озона, зависящие, в основном, от процессов фотохимического образования и распада в тропосфере, увеличились с доиндустриальных времен вследствие увеличения выбросов продуктов-предшественников озона антропогенного происхождения (Олтманс и др., 1998 г.). Активное увеличение концентраций озона во второй половине двадцатого столетия объясняется растущим экономическим развитием регионов, расположенных в средних и низких широтах (Шинделл и др., 2006 г.). Тропосферный озон образовывается в атмосфере из исходных газообразных продуктов при наличии солнечного света. Этими исходными продуктами-прекурсорами являются окислы азота, угарный газ, метан, а также неметановые летучие органические соединения (НМЛОС) (Хааген-Смит, 1952 г., Зайнфельд, 1988 г.). Антропогенные источники прекурсоров включают в себя сжигание и добычу ископаемых видов топлива, сжигание биотоплива, различные промышленные процессы, а также антропогенное горение биомассы. Среди естественных источников предшественников озона – лесные пожары, биогенные выбросы из почв и растительности, а также грозовые разряды.

В загрязненных воздушных массах озон образовывается преимущественно путем быстрой фотохимической реакции окисления НМЛОС при наличии окислов азота (напр., Хамейдес и др., 1992 г.). С другой стороны, фоновый уровень тропосферного озона повышается благодаря метану, в силу его широкого и однообразного глобального распространения (Крутцен, 1973 г., Фьоре и др., 2002 г., Дентнер и др., 2005 г.). В нетропических зонах продолжительность нахождения озона в атмосфере сокращается в летний период вследствие того, что при повышенном воздействии солнечного излучения повышается и скорость фотохимической деструкции (Шинделл и др., 2006 г.). Летом продолжительность жизни озона в атмосфере варьируется от нескольких дней до нескольких недель, а зимой составляет около одного-двух месяцев. Таким образом, озон, образующийся в атмосфере над средними широтами северного полушария, наиболее динамично перемещается в Арктику в течение периода с осени по весну.

**Радиационное воздействие.** Изменения в локальном содержании тропосферного озона влияют на климат Арктики посредством инициализации изменений в локальных потоках солнечного излучения. Однако о том, какую роль играет образование озона в местных масштабах, а также образование прекурсоров в арктической атмосфере, – по сравнению с неарктическими источниками, – известно мало. Среди непосредственно арктических источников образования озона – выбросы в сфере судоходства, увеличения которых можно ожидать уже в ближайшем будущем, учитывая темпы сокращения морского льда. По оценкам, выбросы загрязнений с судов, работающих в арктических широтах, могут в перспективе ближайших десятилетий в два или три раза увеличить уровень озона в атмосфере Арктики, по сравнению с содержанием озона на сегодняшний день (Гранье и др., 2006 г.).

Выбросы прекурсоров озона в субарктических и арктических районах могут также начать повышаться по причине потепления в северных районах и увеличения частоты лесных пожаров (Касишке и др., 2005 г.). При лесных пожарах выделяется большое количество угарного газа и летучих органических углеродных соединений неметанового ряда, которые в совокупности с антропогенными выбросами из тех же регионов могут приводить к образованию высоких концентраций озона. В исследовании Дженоеросо (Дженеросо и др., 2007 г.) было показано, что выбросы угарного газа, произошедшие во время лесных пожаров в северных лесах весной и летом 2003 г. оказали значительное воздействие на уровень содержания озона в арктической атмосфере. Особенно значимым источником повышения уровня озона в Арктике является также сжигание пожнивных остатков в сельскохозяйственных угодьях Восточной Европы и Северной Азии, где подобная практика имеет широкое распространение (Коронци и др., 2006 г.).

В апреле и мае 2006 г. на Шпицбергене ( $79^\circ$  северной широты) специалистами исследовательской станции «Цепелин» был зарегистрирован рекордный уровень концентраций озона в арктической атмосфере (Столь и др., 2007 г.). Этот случай особо тяжелого озонового загрязнения явился результатом комбинации двух факторов – необычно высокой температуры воздуха, державшейся в то время в европейской части Арктики, и огромными выбросами загрязняющих веществ вследствие сжигания сельскохозяйственных отходов в Беларуси, на Украине и в России (см. Рис. 7). Резкое потепление в Арктике послужило причиной сокращения обычных температурных перепадов между регионами-источниками выбросов и регионами-«получателями», из-за чего и произошло перемещение загрязнителей на низких высотах атмосферы. Если потепление в Арктике будет продолжать происходить более быстрыми темпами, чем в средних широтах, в будущем можно будет ожидать более интенсивного переноса агентов воздействия из наиболее загрязненных регионов, за чем

последует увеличенное содержание тропосферного озона и, как результат, – дальнейшее повышение температуры у арктических поверхностей.



Рис. 7. Вид с исследовательской станции «Цепелин», запечатленный во время эпизода с «задымлением» Арктики весной 2006 г. Снимок предоставлен Анн-Кристин Энгвалль (Ann-Christine Engvall) (Столь и др., 2007 г.).

Исследование Шинделла (Шинделл, 2007 г.), проведенное на основе серий экспериментов с климатическими моделями, показало, что между локальным воздействием в Арктике и колебаниями поверхностной температуры в летний период существует строгая взаимосвязь. Следует вывод, что концентрации озона, возникающие как результат лесных пожаров в северных широтах в летний период, оказывают серьезное воздействие на поверхностную температуру в Арктике.

Те же изменения, которые происходят в отдаленных – т.е., внеполярных – концентрациях озона, воздействуют на уровень тепла, переносимого в Арктику из других регионов. По результатам моделирования Шинделла (Шинделл, 2007 г.), данные, получаемые по местному радиационному воздействию, оказываемому озоном в Арктике в периоды с осени по весну, являются не лучшим показателем для оценки температурной реакции у арктических поверхностей. Скорее, поверхностная температура повышается в течение периода с осени по весну в результате удаленного воздействия – либо глобального, либо воздействия, поступающего из нетропических широт северного полушария, – которое становится положительным (т.е., повышает температуру) вследствие увеличенного содержания тропосферного озона. Как указывает Шинделл (Шинделл, 2007 г.), это не говорит о том, что местное воздействие не влияет на климат Арктики, но при тех исторических изменениях в значениях концентраций краткосрочных загрязнителей, которые были использованы при моделировании, удаленное воздействие оказывается доминирующим над локальным, особенно в те месяцы года, когда обратная положительная связь между снегом и альбедо достигает своего пика.

## 2.4 Тропосферные аэрозоли

**Источники и динамика загрязнений.** Каждый год поздней зимой и ранней весной над Арктикой наблюдается своего рода «дымовая завеса», складывающаяся из высоких концентраций тропосферных аэрозолей (напр., Шоу, 1995 г., Сируа и Барри, 1999 г.) (см. Рис. 8). Этот характерный повторяющийся феномен объясняется сочетанием активного изентропического переноса загрязнителей из средних широт в Арктику и инверсии температуры у поверхности, которая препятствует турбулентному переносу (и, следовательно, выходу аэрозолей из тропосферы в результате оседания на поверхность) (Иверсен и Йорангер, 1985 г., Клонецки и др., 2003 г.). Кроме того, сухость арктической тропосферы в эти месяцы способствует тому, что уровень мокрого осаждения частиц остается очень низким, что приводит к особенно продолжительному периоду нахождения аэрозолей в атмосфере (Шоу, 1981 г.).

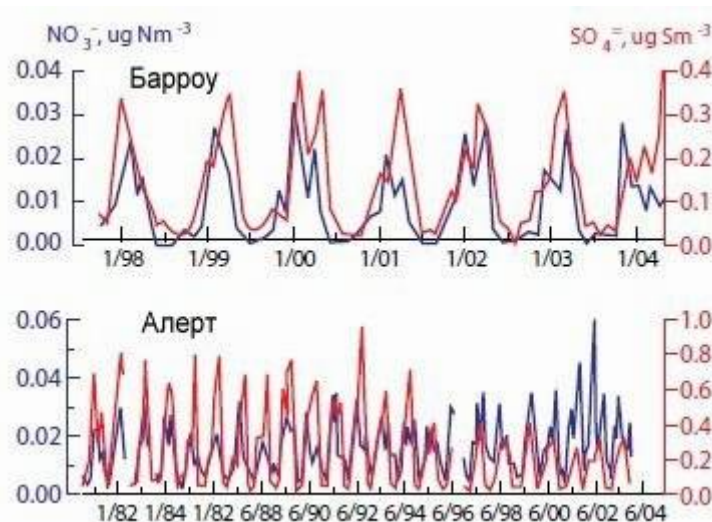


Рис. 8. Временная последовательность среднесесячных концентраций частиц сульфатов и нитратов по наблюдениям на станциях Барроу, Аляска (вверху) и Алерт, Канада (внизу). Графики указывают на повышение содержания частиц в тропосфере в зимний и ранневесенний периоды (Куинн и др., 2007 г.). Данные предоставлены: по Алерту – Канадской национальной системой сбора и обработки данных по атмосферной химии (Canadian National Atmospheric Chemistry (NAtChem) Database and Analysis System); по Барроу – Лабораторией морских тихоокеанских экологических исследований Национального управления по океану и атмосфере США (NOAA/PMEL) (<http://saga.pmel.noaa.gov/data/>).

Долгосрочные наземные измерения содержания сульфатов и рассеяния света в аэрозолях показывают, что начиная с конца 1970-х гг. наиболее высокие концентрации арктического смога наблюдались в 1980-х гг. и в начале 1990-х гг. (Куинн и др., 2007 г.). В поздние 1990-е гг. смоговая ситуация в Арктике улучшилась вследствие уменьшения промышленных выбросов в ранние годы становления новообразовавшихся государств Евразийского континента, а также, в меньшей степени, благодаря более жестким законодательным нормам на выбросы с энерговырабатывающих объектов в Соединенных Штатах и промышленно-развитых странах Европы. По результатам более недавних наблюдений приходится признать, что уровень светорассеяния и концентраций черного углерода, видимо, снова идет на повышение (Шарма и др., 2006 г.). С 1980 г. увеличиваются и продолжают увеличиваться концентрации нитратов, что говорит о том, что несмотря на сократившиеся выбросы серы с энерговырабатывающих предприятий в регионах-источниках загрязнений, растут, тем не менее, выбросы, производимые дизельными и бензиновыми двигателями (см. Рис. 9) (Куинн и др., 2007 г.). Тот же резкий скачок загрязнений, который был зарегистрирован в 2007 г. как следствие сжигания сельскохозяйственных отходов в Восточной Европе (Столь и др., 2007 г.) и который привел к аномальному всплеску концентраций озона, дал как результат и рекордные значения аэрозольной оптической толщины, а также рекордные уровни черного углерода, предупреждая о потенциальной опасности и природных, и планируемых сезонных эпизодов сгорания биомассы.

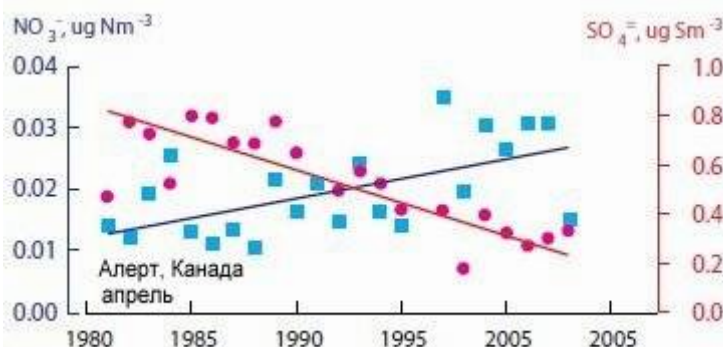


Рис 9. Осредненные месячные показатели концентраций частиц нитратов и сульфатов по наблюдениям в апреле в районе Алерта, Канада. Сплошная линия указывает на рассчитанную по методу Сена динамику, ожидаемую в долгосрочной перспективе, с прогнозируемым сокращением сульфатов вследствие снижаемых выбросов с энергогенерирующих предприятий и повышением содержания нитратов в связи с увеличением выбросов от дизельных и бензиновых двигателей (Куинн и др., 2007 г.). Данные по Алерту предоставлены Канадской национальной системой сбора и обработки данных по атмосферной химии (Canadian National Atmospheric Chemistry (NAtChem) Database and Analysis System).

**Радиационное воздействие.** Тропосферные аэрозоли способны нарушать радиационный баланс атмосферы Земли разными путями (Куинн и др., 2007 г.). Прямое воздействие аэрозолей заключается в поглощении или рассеянии солнечного (коротковолнового) излучения аэрозолями. Например, рассеивающие аэрозоли,

распространяясь над поверхностями с низким альбедо, отражают солнечные лучи, что приводит к охлаждению поверхности, а также атмосферного столба от поверхности до скопления аэрозоля. Поглощающие же аэрозоли, такие как аэрозоли, содержащие частицы сажи (черного углерода), скапливаясь над поверхностями с высокой отражательной способностью, повышают температуру на высотах внутри и выше смогового слоя, что мгновенно вызывает сокращение солнечной энергии у поверхности (Шоу и Стамнес, 1980 г.). Возрастающее атмосферное потепление далее приводит к увеличению длинноволнового излучения, идущего к земной поверхности, таким образом повышая температуру у Земли. Учитывая, что для арктических поверхностей в весенний период характерно иметь высокую отражательную способность, разогревание атмосферного столба от поверхности до скопления аэрозоля может происходить даже в случае аэрозолей с умеренным уровнем поглощения. Самолетными исследованиями, проведенными в ходе Второй Арктической стратосферной аэроэкспедиции (Airborne Arctic Stratospheric Expedition (AASE) II) зимой 1992 г., было зарегистрировано скопление сажеосодержащих аэрозолей на высоте 1,5 км. В работе Пьюшелла и Кинне (Пьюшелл и Кинне, 1995 г.) вычисления показали, что этот слой скопления аэрозолей может привести к разогреванию атмосферно-земной системы над поверхностями с высоким солнечным альбедо (лед/снег) даже при альбедо единичного рассеяния со столь высокими значениями как 0,98. Частицы гидроскопических загрязнителей, поглощая влагу и значительно увеличиваясь в размерах, также могут влиять на радиационный баланс в Арктике, входя во взаимодействие с земным (длинноволновым) излучением (Маккрекен и др., 1986 г.). Это воздействие может иметь большое значение во время полярной ночи, когда длинноволновое излучение превалирует в энергетическом балансе. Исследования, произведенные в Арктике в период, когда солнце опускается за линию горизонта, дают основания предполагать, что арктический смог может иметь заметное прямое тепловое радиационное воздействие, изменяя потоки как нисходящего, так и исходящего длинноволнового излучения (Риттер и др., 2005 г.). Сажа также имеет свой определенный механизм воздействия, известный как «эффект черного углерода и снега», проявляющийся через оседание черного углерода на снежных и ледовых покровах Арктики (Кларк и Нун, 1985 г.). Седиментация черного углерода вызывает потемнение поверхностей, – которые, в свою очередь, начинают поглощать больше солнечного излучения, – и, таким образом, приводит к разогреванию нижних слоев атмосферы и таянию снега и льда. В исследовании Шинделла (Шинделл и др., 2008 г.), проведенном в рамках работы Целевой рабочей группы по переносу загрязнения воздуха в Северном полушарии (см. 2.1 Пути попадания загрязнителей в атмосферу Арктики), было рассмотрено, какой по значимости вклад вносит каждый из различных регионов-источников загрязнения в общую массу отложения черного углерода на поверхностях Гренландии и других районов Арктики (см. Рис. 10). Было обнаружено, что, за исключением Гренландии, больше всего черного углерода в течение всего года в Арктику поступает из Европы. Из общей среднегодовой массы черного углерода, оседающего на арктических поверхностях (за исключением Гренландии), на загрязнения, идущие из Европы, приходится 68%. Только лишь 11% черного углерода поступает с выбросами из Северной Америки, а выбросы из Азии (Южной и Восточной) приносят 22% загрязнений. В случае Гренландии, основную роль, в отличие от выбросов, оседающих в остальных районах Арктики, играют загрязнения, идущие из Северной Америки. Причина – в горном рельефе острова, из-за которого становится возможным приток воздушных масс из более теплых регионов-загрязнителей (Столь, 2006 г.). В годовом масштабе, согласно анализу, проведенному с помощью моделирования, и Северная Америка, и Европа, несут ответственность примерно за 40% всего черного углерода, оседающего в Гренландии, в то время как около 20% поступает из регионов-источников в Азии (Южной и Восточной). Однако распределение долей отдельных регионов-источников в общем загрязнении меняется в зависимости от времени года. В исследовании Шинделла (Шинделл и др., 2008 г.) было показано, что общая масса черного углерода, оседающего в Гренландии в весенний период, поступает, преимущественно, с выбросами из Северной Америки и Восточной Азии. Считается, что черный углерод, оседающий на островных поверхностях весной, приводит к наибольшему усугублению эффекта обратной связи снега и альбедо (Флэннер и др., 2007 г.). Таким образом, выбросы черного углерода из Северной Америки и Восточной Азии, вероятно, играют более серьезную роль в воздействии этого загрязнителя на климат Гренландии, чем можно было бы предположить, исходя только лишь из среднегодовых показателей загрязнений, идущих из этих регионов. В исследовании Шинделла (Шинделл и др., 2008 г.) не учитывались выбросы из регионов Северной Азии (России), которые, по всей вероятности, вносят достаточно значимую долю в загрязнения черного углерода, оседающего на всех арктических поверхностях и, в особенности, вне Гренландии. Помимо исследований, основанных на экспериментах с моделированием, описанных выше, для оценки концентраций черного углерода в снежной массе и источников этого загрязнителя, а также для понимания той роли, которую черный углерод играл в радиационном воздействии, оказываемом на ледовый щит Гренландии и ледовые покровы Арктики за последние 215 лет, использовались также исследования ледовых кернов из центральной Гренландии и измерения содержания в них черного углерода и других индикаторных элементов (Макконнелл и др., 2007 г.). Химический анализ и результаты моделирования с расчетами обратных траекторий движения воздушных масс показывают, что лесные пожары на северо-восточных территориях Северной Америки были, по всей вероятности, наиболее значительным источником концентраций черного углерода в атмосферных осадках, выпадавших в Гренландии в доиндустриальную

эпоху (примерно до 1850 г.), и сохраняли достаточно серьезную роль в общей массе осаднения черного углерода на всем протяжении рассматриваемого периода 215 лет. Однако начиная с 1850 г., черный углерод, оседающий на снежных покровах Гренландии, преимущественно, поступал в атмосферу острова, по-видимому, с промышленными выбросами из Северной Америки (с 1850 по 1950 гг.) и из Азии (с 1950 г. и по настоящее время). В силу краткой продолжительности жизни в атмосфере (около трех дней), концентрации и потоки оседания черного углерода и других тропосферных аэрозолей сильно варьируются как во временных, так и в пространственных пределах. Остается вероятность, что описанные первые результаты исследований по Гренландии являются характерными только для североатлантических районов Арктики, подпадающих под сильное воздействие выбросов загрязнений из Северной Америки и Западной Европы. Периоды интенсивного распространения лесных пожаров в северных широтах могут иметь серьезное значение в качестве источника концентраций черного углерода во всей арктической атмосфере. Исследование Столя (Столь и др., 2006 г.) показало, что летом 2004 г., – года, который ознаменовался масштабными лесными пожарами в Канаде и на Аляске, – уровни поглощения солнечного излучения аэрозолями повысились по всей Арктике. Оседание черного углерода на снежных поверхностях Гренландии подтверждается измерениями содержания черного углерода в снежной массе, проведенными на исследовательской полярной станции Саммит. Лето 2004 г. побило все рекорды по содержанию черного углерода в снежных массах Арктики за последние годы (Хаглер и др., 2007 г.). Тем не менее, сам масштаб концентраций ( $1.0 - 1.4 \text{ ng g}^{-1}$ ) оказался слишком мал, чтобы оказать серьезное воздействие на отражательную способность снега, если бы содержание черного углерода было достаточно равномерно распределено в поверхностных слоях снега (Уоррен и Уискомб, 1985 г., Рис. 2). Тонкий осадочный слой черного углерода на поверхности снега может теоретически сократить отражающую способность поверхности до выпадения нового снега. Однако, даже если у станции Саммит альbedo снежных поверхностей обычно не меняется вследствие осаднения черного углерода, нельзя исключить то значительное воздействие, которое загрязнение черным углеродом имеет в менее гористых районах Арктики, где концентрации черного углерода, в среднем, обычно намного более высоки. Северные лесные пожары в Сибири, возможно, играют более серьезную роль, чем пожары в Северной Америке, в силу самого масштаба распространения пожаров (Столь, 2006 г.). На лесные пожары, охватившие районы Сибири в 2003 г., по оценкам, пришлось от 16% до 33% наблюдавшейся аэрозольной оптической толщины и от 40% до 56% всей массы черного углерода, отложившейся весной и летом выше  $75^\circ$  северной широты (Дженеросо и др., 2007 г.).

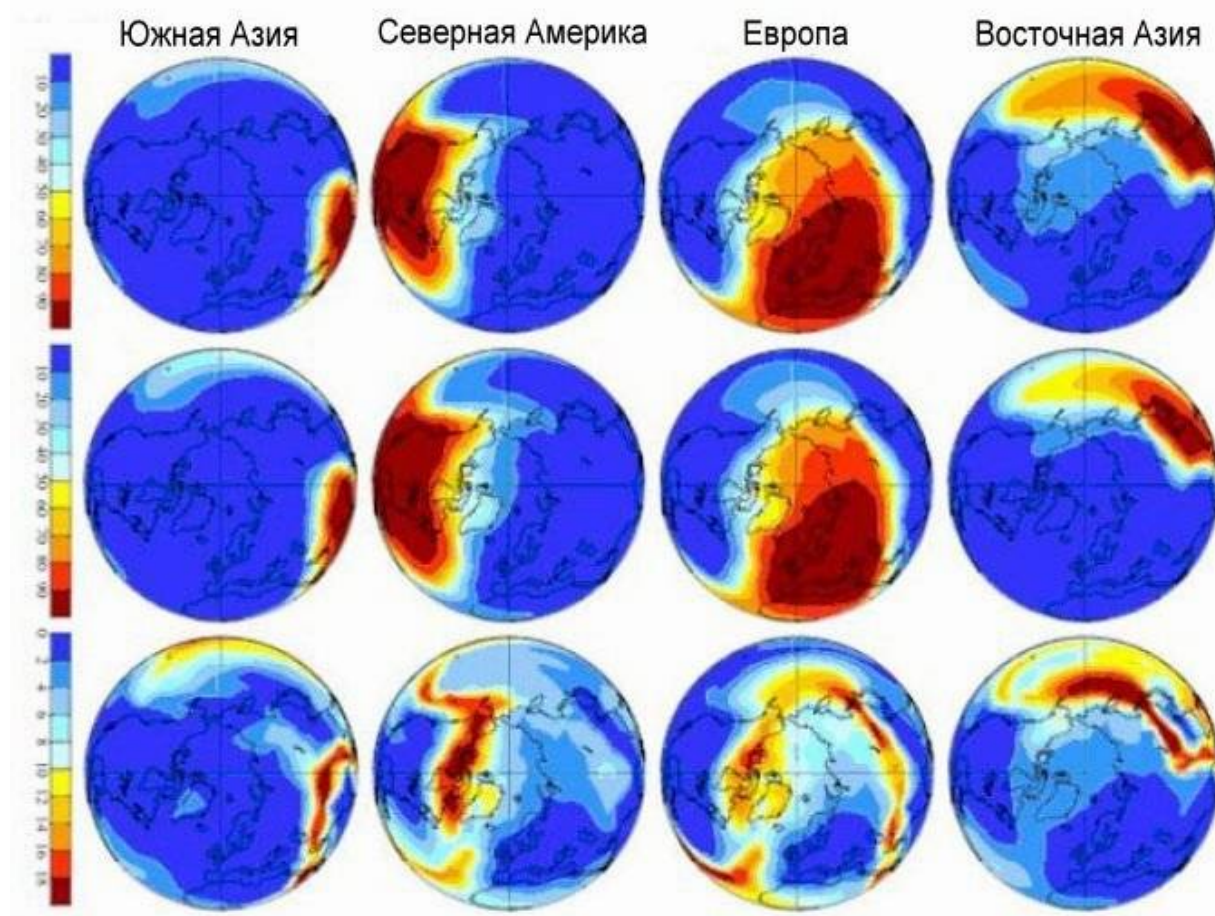


Рис. 10. Доли выбросов из различных регионов-источников загрязнений в общей массе черного углерода, наблюдаемого на поверхностях Арктики в зимний период (данные, находящиеся в жесткой корреляции с

данными по седиментации черного углерода и, следовательно, отражающие общую картину осаждения загрязнителя). Относительные доли (%) в общей реакции на выбросы из четырех регионов-источников (слева), относительные доли (%) на одну единицу выброса из региона-источника (в центре), и стандартное отклонение последних по результатам выполнения всех моделей, использованных в исследовании Целевой рабочей группы по переносу загрязнения воздуха в Северном полушарии (справа) (Шинделл и др., 2008 г.). Когда черный углерод оседает на поверхностях ледников, его воздействие имеет долговременные последствия. Во-первых, оседая непосредственно на поверхности льда, частицы черного углерода, как правило, остаются на ней годами прежде, чем их смывают поверхностные стоки. Натурные исследования выявили, что скопление аэрозолей намного превышает темпы годового оседания аэрозолей. Во-вторых, черный углерод, накапливаясь в снежной массе, отлагающейся на поверхностях больших ледников и ледовых шапок, со временем уходит вглубь и уносится вниз движением льда. Именно это движение льда – и, соответственно, сохранение атмосферных сигналов – позволило Макконнеллу (Макконнелл и др., 2007 г.) задокументировать историческую динамику выбросов черного углерода в Арктическую атмосферу. Движение льда в итоге увлекает «захваченный» льдом черный углерод с ледника вниз и далее, в зону таяния ледового щита Гренландии, где высвобожденный таянием, черный углерод вновь будет уходить в атмосферу в течение многих столетий, а то и тысячелетий.

Воздействие на климат может также быть результатом взаимодействия аэрозолей и облаков. В пределах коротковолнового излучения, в первую очередь, опосредованный эффект воздействия аэрозолей наступает, когда частицы загрязнителя вызывают увеличение концентраций числа облачных капель, уменьшение размера капель и соответствующий рост способности облаков отражать коротковолновое излучение (Туми, 1977 г.). Измерения, произведенные в районе Барроу, Аляска, за четырехгодичный период, показывают, что эпизодическое формирование арктического смога является причиной образования в микроструктурах облаков нижнего яруса высоких концентраций числа облачных капель при малом эффективном радиусе самих капель (Гарретт и др., 2004 г.). Взаимодействие подобного рода между аэрозолями и облаками может также приводить и к значительному воздействию на уровне длинноволнового излучения. Когда в тонких арктических облаках с преобладающим содержанием жидко-капельной влаги вследствие взаимодействия с антропогенными аэрозолями возрастают концентрации числа капель, увеличивается также и способность облаков «улавливать» и заново испускать длинноволновое излучение (Гарретт и Чжао, 2006 г.; Любин и Фогельманн, 2006 г.). В атмосфере над темными поверхностями океана, когда солнце стоит высоко над горизонтом, действие опосредованного коротковолнового эффекта обеспечивает охлаждение поверхности, но при низком солнце и в условиях ярких арктических поверхностей преобладает длинноволновое воздействие. В исследовании Любина и Фогельманна (Любин и Фогельманн, 2007 г.) были произведены опыты с моделированием лучистого переноса для оценки относительных масштабов коротковолновых и длинноволновых нисходящих потоков, вызываемых аэрозолями-источниками арктического смога. Как показали модельные эксперименты, в период марта-апреля нисходящие коротковолновые потоки оказались по параметрам сравнимыми с длинноволновыми. В мае и июне, однако, коротковолновые потоки преобладали над длинноволновыми.

Взаимодействие аэрозолей с облаками может также приводить к увеличению облачности, так как аэрозоли способствуют увеличению концентраций облачных капель. В результате уменьшается объем самих капель, а также объем выпадающих осадков, в то время как продолжительность жизни облака в атмосфере повышается (Альбрехт, 1989 г.). Наконец, есть вероятная связь между возрастающими концентрациями числа облачных капель и пониженными темпами образования льда в арктических облаках смешанной фазы. Уменьшение темпа образования льда снижает уровень высыхания облака льдом и приводит к повышенной длинноволновой излучательной способности облака (Жирар и др., 2005 г.). Впрочем, механизмы образования льда в обычных облаках смешанной фазы до конца не изучены (Фридлин и др., 2007 г.).

## **2.4 Сводная информация: воздействие краткосрочных загрязнителей в Арктике**

Колебания поверхностной температуры в Арктике находятся в жесткой связи с поверхностным радиационным воздействием, т.к. стабильная атмосфера этого региона препятствует быстрому протеканию теплообменных процессов с верхней тропосферой (Хансен и Назаренко, 2004 г.). В свою очередь, масштабы воздействия того или иного загрязнителя с низкой продолжительностью жизни в атмосфере зависят от сезонности целого ряда взаимосвязанных факторов, включая излучение, выпадение осадков, уровень поверхностного альбедо, протяженность снежных и ледовых покровов, а также перенос загрязнителей. В Разделе 3 будут представлены оценки осредненной посезонной динамики воздействия краткосрочных загрязнителей и колебаний поверхностной температуры как реакции на это воздействие. Несмотря на то, что средние оценки температурной реакции являются не самым информативным показателем воздействия краткосрочных загрязнителей, они все же могут послужить некой отправной точкой для понимания направлений дальнейших исследований и разработки стратегии по уменьшению воздействия краткосрочных загрязнителей на климат Арктики.

### 3. Методы

Радиационное воздействие, а также значения, соответствующие температурным реакциям на воздействие метана, тропосферного озона и тропосферных аэрозолей, представлены здесь таким образом, чтобы можно было сравнить эффект, оказываемый этими различными загрязнителями, с точки зрения сезонности, воздействия у поверхности (ВП), воздействия в верхних слоях атмосферы (BVCA), и температурной реакции у поверхности (ДТП).

Методы, использованные для получения осредненных посезонных показателей радиационного воздействия и температурных реакций на воздействие краткосрочных загрязнителей, описаны ниже. Сводная информация по этим показателям приведена в Табл. 1 и 2. Впервые эти данные были опубликованы в исследовании Патриции Куинн (Куинн и др., 2008 г.).

#### 3.1 Воздействие у поверхности и в верхних слоях атмосферы

Осредненные посезонные значения ВП, BVCA, а также BVCA-ВП для каждого из краткосрочных факторов воздействия показаны в Табл. 3. Значения ВП и BVCA как следствие прямого радиационного воздействия тропосферными аэрозолями основаны на вычислениях по Глобальной климатической модели ModelE, проведенных в ходе имитационного моделирования в Институте космических исследований Годдарда Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA Goddard Institute for Space Sciences, GISS) (Кох и Хансен, 2005 г.). Эти значения переданы как изменения в мгновенном воздействии вследствие присовокупления сегодняшних значений выбросов от сжигания ископаемого топлива и биотоплива к исходным значениям модели, а исходные значения соответствуют сегодняшним значениям выбросов от сгорания биомассы. Для сравнения приведены также значения воздействия, оказываемого сегодняшними выбросами от сгорания биомассы, полученные на основе имитационного моделирования, проведенного в Институте Годдарда.

Табл. 1. Описание вычислений осредненных посезонных значений воздействия в Арктике (между  $60^\circ$  и  $90^\circ$  северной широты), полученных как изменение в мгновенном воздействии вследствие сложения выбросов от сжигания ископаемого топлива и биотоплива и сегодняшних выбросов от сжигания биомассы.

Воздействие	Метод	Результат
<i>Тропосферные аэрозоли</i>		
Прямое воздействие		
$\text{SO}_4^{2-} + \text{OC} + \text{черный углерод}$		
Опосредованное воздействие (Облачность и альбедо)	$\text{SO}_4^{2-} + \text{OC} + \text{черный углерод}$	
Длинноволновая излучательная способность облаков		
Эффект связи черного углерода и альбедо снега		
Глобальная климатическая модель ModelE Института Годдарда.		
Вычисления в глобальном масштабе.		
Осредненное воздействие по Арктике.		
Сегодняшние выбросы от сгорания ископаемого и биотоплива, а также биомассы, относительно сегодняшних выбросов от сгорания биомассы.		
Измерения реакции излучательной способности низкоярусных облаков на загрязнения в районе Барроу, Аляска.		
Непосезонное осреднение.		
SNICAR <sup>1</sup> (вычисления по лучистому переносу) в совокупности с моделированием по Глобальной климатической модели CAM3 <sup>2</sup> Центра NCAR <sup>3</sup> .		
Вычисления в глобальном масштабе.		
Осредненное воздействие по Арктике.		
Сегодняшние выбросы от сгорания ископаемого и биотоплива, а также биомассы, относительно сегодняшних выбросов от сгорания биомассы.		
$V_{\text{П}}$ и $V_{\text{ВСА}}$		
Средние значения по Арктике.		
$V_{\text{П}}$ в условиях коинцидентности низколежащих облаков и аэрозольных загрязнений.		
$V_{\text{П}}$		
Средние значения по Арктике.		
<i>Тропосферный озон</i>		

1 SNICAR – Snow, Ice, and Aerosol Radiative Model (Модель взаимосвязей радиационного воздействия аэрозолей, снега и льда).

2 CAM3 – Community Atmosphere Model (Общая атмосферная модель).

3 NCAR – National Center for Atmospheric Research, Национальный центр атмосферных исследований, г. Боулдер, Колорадо, США.

Потепление от воздействия парниковых газов + поглощение коротковолнового излучения  
Model II Института Годдарда.  
Вычисления в глобальном масштабе.  
Осредненное воздействие по Арктике.  
Временной период с 1880 по 2003 гг.  
Выбросы от сгорания ископаемого и биотоплива, а также биомассы.  
**В<sub>вса</sub>**

**Средние значения по Арктике.**

#### *Метан*

Потепление от воздействия парниковых газов  
Глобальная климатическая модель Model II Института Годдарда.  
Вычисления в глобальном масштабе.  
Осредненное воздействие по Арктике.  
Временной период с 1900 по 2001 гг.  
Изменения в общем балансе глобально распространенных парниковых газов с учетом доли метана в общем воздействии (0,2) и его эффективности относительно общего воздействия (1,05/1,02).

**В<sub>вса</sub>**

**Средние значения по Арктике.**

Табл. 2. Описание вычисления осредненных посезонных показателей поверхностных температурных реакций в Арктике (между 60° и 90° северной широты) как следствия воздействия загрязнителей с краткой продолжительностью жизни в атмосфере.

#### **Воздействие**

##### **Метод**

##### **Результат**

*Тропосферные аэрозоли*

#### **Прямое воздействие**

SO<sub>4</sub><sup>-</sup> + OC + черный углерод

**Опосредованное воздействие** (Только влияние облачности) SO<sub>4</sub><sup>-</sup> + OC + черный углерод

**Длинноволновая излучательная способность облаков**

**Эффект связи черного углерода и альbedo снега**

**Атмосферное потепление вследствие скоплений черного углерода**

Глобальная климатическая модель ModelE Института Годдарда.

Изменение в среднем региональном температурном показателе, осредненное по Арктике, как реакция на глобальное воздействие.

На основе измерений реакции излучательной способности низкоярусных облаков на загрязнения в районе Барроу, Аляска.

SNICAR в совокупности с моделированием по Глобальной климатической модели CAM3 Центра NCAR.

1 Втм<sup>-2</sup> = 0.15 °C (МГЭИК, 2007 г).

ΔT<sub>п</sub> (°C), средние значения по Арктике.

ΔT<sub>п</sub> (°C) в условиях коинцидентности низколежащих облаков и аэрозольных загрязнений.

ΔT<sub>п</sub> (°C), средние значения по Арктике.

ΔT<sub>п</sub> (°C), средние значения по Арктике.

#### *Тропосферный озон*

Потепление от воздействия парниковых газов + поглощение коротковолнового излучения

**Model II Института Годдарда.**

**Изменение в среднем региональном температурном показателе, осредненное по Арктике, как реакция на глобальное воздействие.**

**ΔT<sub>п</sub> (°C), средние значения по Арктике.**

#### *Метан*

Потепление от воздействия парниковых газов

Глобальная климатическая модель Model II Института Годдарда.

**Изменение в среднем региональном температурном показателе, осредненное по Арктике, как реакция на глобальное воздействие.**

$\Delta T_{II}$  (°C), средние значения по Арктике.

Табл. 3. Сравнение сезонности и масштабов воздействия, а также поверхностной температурной реакции как следствия воздействия загрязнителей с краткой продолжительностью жизни в Арктике (между 60° и 90° северной широты). Показатели ВП и ВВСА получены как изменение в мгновенном воздействии вследствие сложения выбросов от сжигания ископаемого топлива и биотоплива и сегодняшних выбросов от сжигания биомассы. Распределение по месяцам: зима=декабрь, январь, февраль, весна=март, апрель, май, лето=июнь, июль, август, осень=сентябрь, октябрь, ноябрь.

Загрязнитель	Время года	$V_{II}, \text{Втм}^{-2}$	$V_{BCA}, \text{Втм}^{-2}$	$V_{BCA} - V_{II}, \text{Втм}^{-2}$	$\Delta T_{II}^a, ^\circ\text{C}$
<b>Тропосферные аэрозоли – прямое воздействие<sup>b</sup></b>					
Общая масса*	Зима	-0,04 (-0,001)	0,08 (0,004)	0,12 (0,005)	-1,4 <sup>c</sup>
Ископаемое+биотопливо	Весна	-0,72 (-0,1)	0,92 (0,17)	1,6 (0,27)	-0,93 <sup>c</sup>
(Сгорание биомассы)	Лето	-0,93 (-0,43)	0,11 (0,16)	1,0 (0,59)	-0,47 <sup>c</sup>
*SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + ОС + черный углерод	Осень	-0,14 (-0,07)	0,08 (0,04)	0,22 (0,11)	-1,1 <sup>c</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Зима	-0,006	-0,01	-0,006	
Ископаемое топливо	Весна	-0,26	-0,32	-0,06	
	Лето	-0,50	-0,54	-0,04	
	Осень	-0,07	-0,08	-0,01	
ОС	Зима	-0,003 (0)	0 (0)	0,003 (0)	
Ископаемое+биотопливо	Весна	-0,06 (-0,05)	0,03 (0,02)	0,09 (0,07)	
(Сгорание биомассы)	Лето	-0,04 (-0,24)	-0,01 (-0,09)	0,03 (0,15)	
	Осень	-0,008 (-0,04)	-0,001 (-0,02)	0,007 (0,02)	
Черный углерод	Зима	-0,03 (-0,001)	0,09 (0,004)	0,12 (0,005)	0,02 <sup>d</sup>
Ископаемое+биотопливо	Весна	-0,39 (-0,05)	1,2 (0,15)	1,6 (0,20)	0,24 <sup>d</sup>
(Сгорание биомассы)	Лето	-0,39 (-0,19)	0,66 (0,25)	1,0 (0,44)	0,15 <sup>d</sup>
	Осень	-0,07 (-0,03)	0,16 (0,05)	0,23 (0,08)	0,03 <sup>d</sup>
<b>Тропосферные аэрозоли – опосредованное воздействие</b>					
Общая масса*	Зима	-0,04, 0,24, 0,2 <sup>c</sup>	0,07, -0,1, -0,03 <sup>f</sup>	0,11, -0,34, -0,23	-0,77 <sup>g</sup>
Ископаемое+биотопливо	Весна	-3,0, 1,9, -1,1	0, 0,1, 0,1	3,0, -1,8, 1,2	-0,68 <sup>g</sup>
Альбе́до облаков + облачность	Лето	-12,2, -0,5, -13	6,6, -0,5, 6,1	19, 0, 19	-0,45 <sup>g</sup>
KB, ДВ, KB+ДВ	Осень	-0,4, -0,1, -0,5	0,49, -0,9, -0,41	0,89, -0,8, 0,09	-0,89 <sup>g</sup>
*SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> + ОС + черный углерод					
ДВ излучательная способность облаков	Зима	+3,3 до 5,2 <sup>h</sup>			1 до 1,6 <sup>h</sup>
<b>Связь черный углерод-альбе́до снега</b>					
Черный углерод	Зима	0,02 <sup>i</sup>			0,27-0,61 <sup>i</sup>
Ископаемое+биотопливо	Весна	0,53 <sup>i</sup>			0,36-0,76 <sup>i</sup>
	Лето	0,21 <sup>i</sup>			0,24-0,59 <sup>i</sup>
	Осень	0,002 <sup>i</sup>			0,31-0,76 <sup>i</sup>
<b>Тропосферный озон – потепление от воздействия парниковых газов + поглощение коротковолнового излучения<sup>j</sup></b>					
O <sub>3</sub>	Зима		0,13		0,43
Ископаемое+биотопливо и	Весна		0,34		0,31
Сгорание биомассы	Лето		0,14		0,11
	Осень		0,24		0,26
<b>Метан – потепление от воздействия парниковых газов<sup>k</sup></b>					
Метан	Зима		0,29		0,34
	Весна		0,45		0,27
	Лето		0,55		0,15
	Осень		0,34		0,35

<sup>a</sup> Изменение в среднем региональном показателе температуры у поверхности в регионе от 60° до 90° северной широты. В климатических моделях, использованных для вычисления показателей в Арктике, измерялось глобальное воздействие (относящееся не только к арктическому региону) и меняющийся состав.

<sup>b</sup> Значения ВП и ВВСА основаны на вычислениях по Глобальной климатической модели ModelE, проведенных в Институте космических исследований Годдарда (NASA Goddard Institute for Space Sciences, GISS), и получены соотношением сегодняшних выбросов от сжигания ископаемого топлива, биотоплива и биомассы к сегодняшним выбросам от сгорания биомассы (Кох и Хансен, 2005 г.). Значения, соответствующие сегодняшним выбросам от сгорания биомассы, указаны в скобках.

<sup>c</sup> Значения указаны как изменение в среднем региональном показателе температуры у поверхности за период с 1880 по 2003 гг. в отношении к половине сегодняшних выбросов от сгорания биомассы. Данные вычисления не включают выбросов от сжигания биотоплива. Небольшой источник выбросов от сжигания ископаемого топлива был включен в вычисления по периоду конца 1880-х гг. Данные взяты из Рис. 11 исследования Хансена (Хансен и др., 2007 г.).

<sup>d</sup> Согласно вычислениям, полученным по значениям ВВСА-ВП, черный углерод – ископаемое+биотопливо, и исходя из предположения, что  $1 \text{ Втм}^{-2} = 0.15^{\circ}\text{C}$  (МГЭИК, 2007 г.).

<sup>e</sup> Прямое и опосредованное воздействие (альбеда облаков и облачный покров) в совокупности. Значения основаны на вычислениях по Глобальной климатической модели ModelE Института космических исследований Годдарда (NASA Goddard Institute for Space Sciences, GISS), и получены соотношением сегодняшних выбросов от сжигания ископаемого топлива, биотоплива и биомассы к сегодняшним выбросам от сгорания биомассы (Менон и Ротстайн, 2006 г.). Даны три показателя – коротковолновое (КВ), длинноволновое (ДВ) и коротковолновое плюс длинноволновое (КВ+ДВ) воздействие.

<sup>f</sup> Данные основаны на вычислениях по Глобальной климатической модели ModelE Института космических исследований Годдарда (NASA Goddard Institute for Space Sciences, GISS), с учетом изменений в фактическом облачно-радиационном воздействии с использованием вышеописанных сценариев выбросов.

Даны три показателя – коротковолновое (КВ), длинноволновое (ДВ) и коротковолновое плюс длинноволновое (КВ+ДВ) воздействие.

<sup>g</sup> Показаны только изменения температуры вследствие опосредованного воздействия аэрозолей на облачный покров. Данные взяты из Рис. 11 исследования Хансена (Хансен и др., 2007 г.).

<sup>h</sup> Данные основаны на измерениях реакций излучательной способности низкоярусных облаков на загрязнения в районе Барроу, Аляска (Гарретт и Чжао, 2006 г.). Значения осреднены в непосезонной динамике, т.к. включают только периоды коинцидентности аэрозольного загрязнения и облачного покрова.

<sup>i</sup> Значения основаны на вычислениях лучистого переноса, полученных с использованием модели SNICAR и Глобальной климатической модели CAM3 Центра NCAR. Использовано соотношение сегодняшних выбросов от сжигания ископаемого топлива, биотоплива и биомассы к сегодняшним выбросам от сгорания биомассы (Флэннер и др., 2007 г.).

<sup>j</sup> Воздействие озона рассчитано для пограничных слоев тропосферы над 60°-90° северной широты на период с 1900 по 2000 гг. (Шинделл и др., 2006 г.).

<sup>k</sup> Воздействие метана, а также результирующие реакции, получены путем моделирования динамики на период с 1900 по 2001 гг. исходя из изменений в общем балансе глобально распространенных парниковых газов с учетом частичной доли метана в общем воздействии (0,20) и его эффективности относительно общего воздействия парниковых газов (1,05/1,02). Т.к. глобально распространенные парниковые газы характеризуются равномерным распространением в атмосфере, подобный подход представляется реалистичным. Значения рассчитаны для слоев тропопаузы.

В расчете данных по тропосферному озону учитывается роль метана в образовании озона. Исходя из степени «участия» метана в повышении глобального содержания тропосферного озона, на метан приходится примерно 50% всего повышения глобальных концентраций тропосферного озона. Однако в случае Арктики процентная доля участия метана в повышении арктических концентраций озона оказывается ниже, т.к. колебания в содержании озона в арктической атмосфере находятся в преимущественной зависимости от повышения уровня окислов азота (Шинделл и др., 2005 г.).

ВП и ВВСА были рассчитаны для «общей массы» аэрозольных загрязнений, включающей в себя сульфаты, органический углерод (ОС) и черный углерод, а также для отдельных загрязнителей (сульфата, органического углерода и черного углерода). Значения воздействия, полученные путем вычислений в глобальном масштабе, были осреднены для региона, ограниченного 60° и 90° северной широты. Данные по ВП и ВВСА через опосредованное радиационное воздействие тропосферных аэрозолей были получены на основе вычислений по Глобальной климатической модели ModelE Института космических исследований Годдарда, произведенных как по прямому воздействию, так и опосредованному воздействию, где опосредованные эффекты воздействия включали в себя факторы, привносимые отражательной способностью облаков и облачным покровом (Менон и Ротстайн, 2006 г.). Показатели коротковолнового, длинноволнового и комбинированного (коротковолновое плюс длинноволновое) воздействия по ВП и ВВСА даны к «общей массе» аэрозольных загрязнений (сульфаты, органический углерод, черный углерод). Что же касается вычислений прямого радиационного воздействия, данные по этому воздействию представлены как изменения в мгновенном воздействии при присовокуплении выбросов от сжигания ископаемого топлива и биотоплива к исходным значениям модели, где исходные значения соответствуют сегодняшним значениям выбросов от сгорания биомассы.

Исходя из анализа, проведенного в исследовании Гарретта и Чжао (Гарретт и Чжао, 2006 г.), повышенной длинноволновой излучательной способности облаков как следствию смога, являющегося результатом загрязнений, соответствует область значений ВП, действительная для зимнего периода. На основе четырехлетних наземных измерений аэрозольных концентраций и радиационных потоков, авторы исследования (Гарретт и Чжао, 2006 г.) обнаружили, что в условиях коинцидентности тонких водяных облаков и загрязнений отмечается повышение длинноволновой излучательной способности облаков,

исходящее из слоев смога выше уровня поверхности Земли. Таким образом, в Табл. 3 вместо посезонных средних величин приведена область значений наблюдаемого воздействия и соответствующих поверхностных температурных реакций.

Воздействие черного углерода через оседание на снежных поверхностях вследствие сегодняшних выбросов от сгорания ископаемого топлива, биотоплива и биомассы было рассчитано для арктического региона (между 60° и 90° северной широты) в отношении к сегодняшним выбросам от сгорания биомассы с использованием модели SNICAR (Snow, Ice, and Aerosol Radiative Model, Модель взаимосвязей радиационного воздействия аэрозолей, снега и льда) в сочетании с моделированием по Модели общей циркуляции CAM3 Центра NCAR<sup>4</sup> (Флэннер и др., 2007 г.).

Значения BVCA по тропосферному озону, представленные в Табл. 3, являются значениями по мгновенному воздействию в пограничных слоях тропосферы – в тропопаузе, – полученными на основе химических вычислений, рассчитанных по модели ModelII Института Годдарда для периода с 1880 по 2003 гг. (Шинделл и др., 2006 г.). Значения BVCA по метану рассчитаны для пограничных слоев тропосферы на основе результатов моделирования на период с 1900 по 2001 гг., исходя из изменений в общем балансе глобально распространенных парниковых газов и частичной доли метана в общем воздействии (0,20) и его эффективности относительно общего воздействия парниковых газов (1,05/1,02). В расчете данных по тропосферному озону учтена роль метана в образовании озона.

### **3.2 Поверхностные температурные реакции**

В Табл. 3 показаны осредненные посезонные колебания поверхностной температуры Арктики вследствие влияния загрязнителей краткосрочного действия. Моделирование климата с целью получения величин изменения поверхностной температуры Арктики производилось в глобальном масштабе и с учетом меняющегося атмосферного состава. Значения по прямому и опосредованному воздействию тропосферных аэрозолей были получены в ходе климатического моделирования с использованием ModelE Института Годдарда (данные взяты из Рис. 11 исследования Хансена (Хансен и др., 2007 г.)). Данные по опосредованному воздействию включают в себя только температурные реакции, вызванные изменениями в облачности. Эти результаты даны как изменение в среднем региональном показателе температуры у поверхности за период с 1880 по 2003 гг., где исходный показатель за 1880 г. включает в себя небольшой источник выбросов от сжигания ископаемого топлива, а также выбросы от сгорания биомассы на уровне половины выбросов, уходящих в атмосферу вследствие сгорания биомассы сегодня. Выбросы от сжигания биотоплива не были учтены при этих вычислениях. Температурные реакции как следствие оседания черного углерода на снежных и ледовых поверхностях были рассчитаны с помощью модели SNICAR в сочетании с моделированием по Модели общей циркуляции CAM3 Центра NCAR и с использованием сценариев выбросов, описанных в предыдущем разделе (Флэннер и др., 2007 г.).

Данные по температурным реакциям, происходящим вследствие воздействия тропосферного озона и метана, получены на основе вычислений по модели ModelE Института Годдарда, приведенных в исследованиях Шинделла (Шинделл и др., 2006 г.) и Хансена (Хансен и др., 2007 г.). Эти результаты были рассчитаны на основе региональных осредненных величин и временных периодов, уже упомянутых выше. Данные по поверхностным температурным реакциям, являющимся результатом повышенной длинноволновой излучательной способности облаков, основаны непосредственно на значениях по ВП, указанных в Табл. 3 (Гарретт и Чжао, 2006 г.).

### **3.3 Эффективность моделирования и приблизительность данных**

Поскольку, согласно Куинн (Куинн и др., 2008 г.), вышеописанные данные являются первыми посезонными осредненными оценками воздействия краткосрочных загрязнителей в Арктике, трудно определить точность моделирования, использованного для этих оценок, сравнивая его результаты с результатами вычислений, проведенных по другим моделям. Однако возможно провести сравнительный анализ географического распространения различных аэрозольных видов и оценок воздействия, осредненных в годовом и глобальном масштабе. Модель Института космических исследований Годдарда Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA Goddard Institute for Space Sciences, GISS), использованная для расчета прямого и опосредованного воздействия аэрозолей, была рассмотрена в тщательном сравнении с другими моделями глобального воздействия аэрозолей в рамках открытого международного проекта «Сравнение аэрозольных наблюдений и моделей» (**Aerosol Comparisons between Observations and Models**, AeroCom). Сравнительный анализ, проведенный по скоплениям черного углерода в полярных регионах между значениями, полученными с помощью шестнадцати различных моделей, показал, что в двух исследованиях концентрации черного углерода в Арктике оказались больше 7%, в пяти других – от 6% до 7%, и еще в девяти значения черного углерода оказались ниже 6% (Текстор и др., 2006 г.).

---

4 См. Ссылки 2 и 3.

Результаты модели Института Годдарда – 7% черного углерода в Арктике – находятся в пределах описываемой вариативности. Таким образом, эффективность работы этой модели такова, что вычисления с ее использованием оказываются ближе к верхнему пределу в возможном разбросе величин, но, тем не менее, не за его границами.

В исследовании Шульца (Шульц и др., 2006 г.), также проведенном в рамках проекта AeroCom, был произведен сравнительный анализ общего среднегодового прямого аэрозольного воздействия по значениям, полученным с помощью девяти различных моделей глобальной аэрозольной циркуляции. По результатам сравнения, модель Института Годдарда и еще одна глобальная климатическая модель, разработанная в Университете Осло (UIO-GCM), обнаружили наиболее положительные величины прямого аэрозольного воздействия в Арктике – от 0.02 до 0.05 Втм<sup>-2</sup> против 0.0 до 0.2 Втм<sup>-2</sup> – вследствие более значительных концентраций переносимого в регион черного углерода. Однако сравнение между значениями концентраций черного углерода, полученными в ходе исследования по модели Института Годдарда, и результатами исследований, проведенных на Шпицбергене и на двух станциях на Аляске, не показало систематических погрешностей в работе модели Института Годдарда (Кох и др., 2007 г.). Соотношение смоделированных величин к наблюдаемым в ходе натурных исследований составило, по итогам сравнения, между 0,5 и 0,67 в случае исследования на Шпицбергене (концентрации, показанные моделью, оказались ниже полученных опытным путем) и между 0,67 и 1,5 при сравнении с результатами исследований на Аляске.

Фактор приблизительности данных в модельных исследованиях взаимосвязи черный углерод-альbedo снега возникает из следующих аспектов: параметры выбросов загрязнителя, образование «старого» снега (фирна) и вымывание загрязнений с талой водой, оптические свойства черного углерода, и т.н. относительная величина снежного покрова (snow cover fraction), т.е. степень покрытия ячейки модельной сетки (или элемента поверхности) снегом. При этом каждый из этих аспектов обеспечивает свой вклад в общую приблизительность данных в том порядке, в каком они перечислены выше. Учитывая степень погрешности, добавляемую каждым из этих аспектов, потенциальный разброс значений в определении воздействия черного углерода через оседание на снежных покровах оказывается в пределах от -87% до +240% по отношению к «центральному» значениям, приведенным здесь. Подобный разброс красноречиво свидетельствует о сегодняшнем уровне понимания этого механизма воздействия. В глобальном, среднегодовом исчислении, модель, использованная в данном исследовании, дала оценку воздействия по выбросам черного углерода через сгорание ископаемого топлива и биотоплива на уровне +0.04 Втм<sup>-2</sup> – несколько ниже, чем значения, приведенные в работах Хансена (Хансен и др., 2005 г.) и Якобсона (Якобсон, 2004 г.), где оценки воздействия составляли +0.05 Втм<sup>-2</sup> и +0.06 Втм<sup>-2</sup> соответственно.

Различные оценки глобального среднегодового радиационного воздействия как следствия роста концентраций тропосферного озона с доиндустриальной эпохи до настоящего времени были получены в ходе целого ряда модельных исследований, хотя влияние данных, полученных опытным путем, на определение четких границ этих расчетов минимально. Расчеты по временной исторической динамике тропосферного озона, использованные в описываемых здесь имитационных экспериментах с моделью Института Годдарда были взяты из исследования Шинделла (Шинделл и др., 2003 г.). По результатам работы Шинделла скорректированная оценка глобального среднегодового радиационного воздействия как следствия эволюции содержания тропосферного озона с доиндустриального периода до настоящего времени – 0.30–0.33 Втм<sup>-2</sup>, с учетом уровня выбросов – приближается к центральным значениям в диапазоне вариативности, приведенном в самом последнем по времени исследовании МГЭИК (МГЭИК, 2007 г.) и ограниченном пределами от 0.25 Втм<sup>-2</sup> до 0.45 Втм<sup>-2</sup> (где среднее значение установлено на уровне 0.34 Втм<sup>-2</sup>, а стандартное отклонение составляет 0.07 Втм<sup>-2</sup>). Дополнительную трудность в получении точных данных по воздействию тропосферного озона представляет нехватка информации о выбросах прекурсоров озона в доиндустриальную эпоху. Фактор неопределенности в оценках глобального среднегодового радиационного воздействия вследствие роста содержания метана со времени доиндустриальной эпохи и до сегодняшнего дня очень невелик и составляет лишь 10% от общей величины воздействия, оцененной экспертами МГЭИК на уровне 0.48 Втм<sup>-2</sup> (МГЭИК, 2007 г.).

Чувствительность климата Арктики к локальному либо удаленному воздействию не была количественно определена в различных модельных исследованиях. Таким образом, оказывается невозможным сравнить оценки климатических реакций, приведенные выше, с результатами других исследований. Однако представляется возможным оценить чувствительность климата в тех случаях, где чувствительность климата определяется как «изменение равновесного состояния глобальной средней температуры на поверхности Земли в результате удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере». Оценки чувствительности климата, полученные в ходе исследований с моделями Института Годдарда и Центра NCAR, в обоих случаях показали результат в 2.7°C – значение, находящееся в центре диапазона вариативности от 2°C до 4.5°C, образуемого по итогам исследований с самыми передовыми глобальными климатическими моделями на сегодняшний день (Кизл и др., 2006 г., Кизл, 2007 г.).

## 4. Сезонность и масштабы воздействия краткосрочных загрязнителей и поверхностные температурные реакции

Приведенный ниже Рис. 11 иллюстрирует тот значительный эффект, который вызывающие потепление загрязнители краткосрочного действия оказывают на температурные реакции как в целом на планете, так и в Арктике, в частности, и который не относится к последствиям выбросов углекислого газа. В глобальном среднегодовом масштабе повышение температуры, вызываемое потепляющим эффектом от общей массы краткосрочных загрязнителей, составляет примерно 70% по сравнению с потеплением, вызываемым концентрациями углекислого газа. Но в случае арктических регионов повышение поверхностной температуры как результат действия общей массы краткосрочных загрязнителей составляет уже 80% от уровня потепления, вызываемого углекислым газом. Принимается как предположение, что в случае температурной реакции на действие черного углерода в атмосфере изменение температуры, происходящее в ответ на это воздействие, составляет  $0.15^{\circ}\text{C}$  при воздействии на уровне  $1 \text{ Втм}^{-2}$  (МГЭИК, 2007 г.). Однако следствием такой предпосылки может быть недооценка фактической температурной реакции, т.к. не принимается во внимание внутреннее перемешивание черного углерода с другими типами аэрозолей, что усугубляет воздействие загрязнителя (Раманатан и Кармайкл, 2008 г.). Кроме того, степень воздействия атмосферных концентраций черного углерода зависит от высоты, на которой аэрозольная концентрация с содержанием черного углерода находится в атмосфере. Воздействие черного углерода оказывается значительнее, если концентрация загрязнителя располагается над поверхностью, поскольку в этом случае черный углерод способен поглощать солнечное излучение, отражаемое от низколежащих облаков.

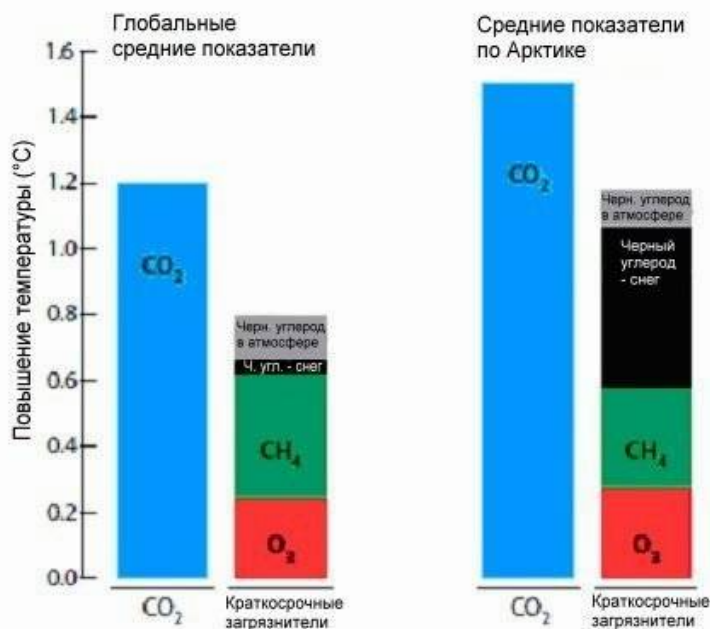


Рис. 11. Осредненное годовое повышение температуры вследствие воздействия углекислого газа и потепления, вызываемого краткосрочными загрязнителями, по сравнению с доиндустриальным периодом. Слева – значения, соответствующие глобальному повышению температуры поверхности, справа – значения, полученные по арктическому региону. Источники данных: глобальные значения – МГЭИК (МГЭИК, 2007 г.), значения по Арктике – Куинн (Куинн и др., 2008 г.). Следует отметить, что охлаждение как отдельное следствие воздействия краткосрочных загрязнителей не отражено на графиках. Тем не менее, оно может, хотя и не обязательно, способствовать частичной нейтрализации или задержке процесса потепления (см. подробнее ниже).

Как было описано выше, масштабы воздействия каждого из краткосрочных загрязнителей и вызываемые ими температурные реакции зависят от времени года. Следовательно, предметом рассмотрения здесь становятся сезонно осредненные данные. В Рис. 12 кратко описан упрощенный сценарий радиационных процессов, загрязнения и переноса загрязнителей в Арктике, распределенный по отдельным сезонам года. В среднем по арктическому региону, обозначенному в данном докладе как диапазон между  $60^{\circ}$  и  $90^{\circ}$  северной широты, воздействие от скоплений тропосферного озона выходит на максимальный уровень в период весны (см. Табл. 3), когда эффективно работает перенос из регионов, находящихся на более южных широтах, сохраняются существенные концентрации прекурсоров озона, накопленные зимой в условиях минимального фотохимического распада, и имеется высокий уровень солнечного излучения, который делает возможным фотохимическое образование озона. Летом воздействие тропосферного озона также может быть

значительным, особенно в условиях, когда выбросы от сжигания сельскохозяйственных отходов или северных лесных пожаров повышают концентрации озона в атмосфере Арктики. Данные, приведенные по воздействию тропосферного озона в летний период (см. Табл. 3), получены стандартными климатологическими расчетами на основе сегодняшних данных по выбросам от сгорания биомассы (включая лесные пожары) (Шинделл и др., 2006 г.). Таким образом, они не отражают тех всплесков в концентрациях тропосферного озона, которые происходили в годы исключительно интенсивных лесных пожаров.

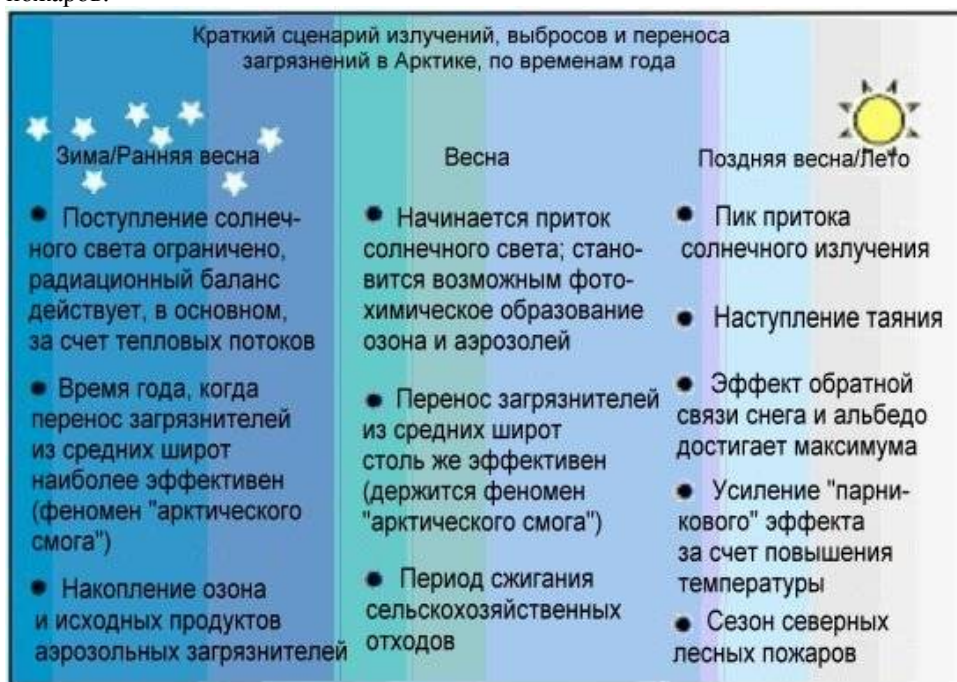


Рис. 12. Краткий сценарий радиационных процессов, источников выбросов и процессов перемещения загрязнений в Арктике, распределенный по временам года.

Воздействие метана, не находящееся в зависимости от сезонности переноса загрязнений, происходит с максимальной эффективностью весной и летом, когда арктические поверхности нагреваются и, следовательно, парниковый эффект выражен наиболее ярко. Поверхностные температурные реакции на воздействие и озона, и метана, – показанные здесь как повышение температуры на  $0.43^{\circ}\text{C}$  и  $0.34^{\circ}\text{C}$ , соответственно (см. Табл. 3 и Рис. 13), – более заметны зимой, когда воздействие минимально. Такое «рассогласование» может указывать на то, что либо температура у поверхности земли в Арктике реагирует на воздействие (локальное или внеполярное) с задержкой, либо поверхностные температурные реакции вызываются динамическим воздействием, происходящим в это время года в других регионах Земли, либо они усугубляются сокращением эффекта инверсии температуры у поверхности, который особенно интенсивно проявляется зимой.

В Арктике масштабы и сами механизмы климатического воздействия аэрозолей подчиняются законам взаимозависимости самых различных факторов – сезонности процессов переноса, доступности или недоступности солнечного света, таяния снега и льда, оседания загрязнителей. Зимой и ранней весной, когда особенно активны процессы перемещения в Арктику загрязнителей с средних широт, поступление солнечного света ограничено, так что радиационный баланс функционирует, преимущественно, за счет тепловых потоков. Взаимодействие между образующейся из-за аэрозолей-загрязнителей «дымовая завеса» и тонкими водяными облаками, преобладающими в это время года, приводит к увеличению длинноволновой излучающей способности тонких облаков. Длительные наземные наблюдения показывают, что когда загрязнения и облачные условия совпадают, результатом является положительное воздействие у поверхности в масштабе от  $+3.3\text{ Втм}^{-2}$  до  $5.2\text{ Втм}^{-2}$ , которое, по оценкам, приводит к еще большему потеплению поверхности, на уровне от  $1^{\circ}$  до  $1.6^{\circ}\text{C}$  (Гарретт и Чжао, 2006 г.).

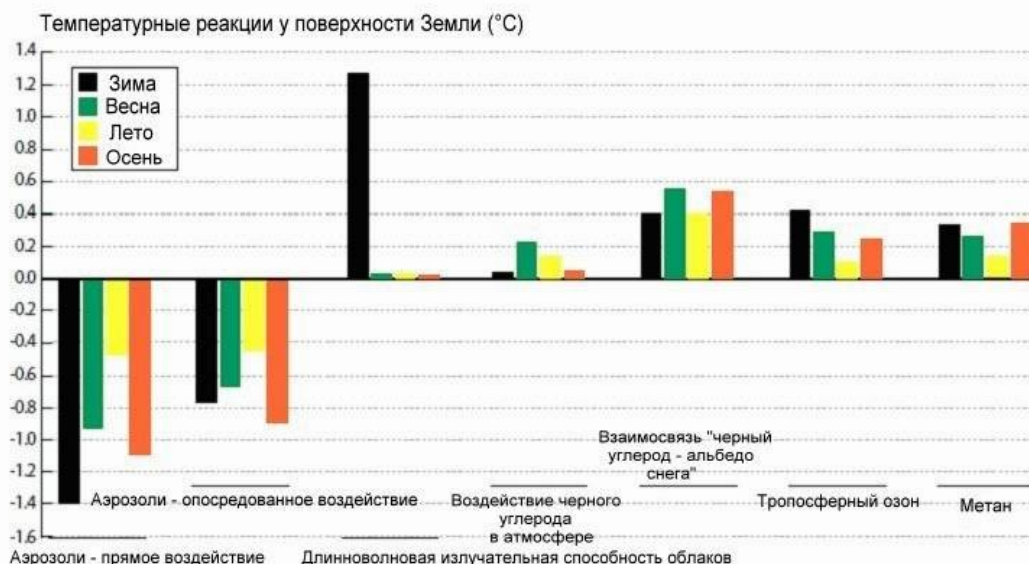


Рис. 13. Посезонные осредненные оценки температурных реакций у поверхности Земли, рассчитанные по результатам вычислений, проиллюстрированных в Разделе 3 и Табл. 3, для региона между  $60^\circ$  и  $90^\circ$  северной широты. Значения по длинноволновой излучательной способности облаков не являются средними сезонными величинами, т.к. отражают только те условия, когда загрязнения аэрозольными концентрациями совпадали с облачностью. В тех случаях, когда вместо точных величин в Табл. 3 приводились диапазоны разброса значений, в графики были заложены центральные значения.

Зимой и весной, по причине перемещения смоговой завесы из средних широт, в атмосфере Арктики увеличиваются концентрации черного углерода. Находясь в атмосфере, скопления частиц черного углерода поглощают солнечные лучи, что приводит к потеплению над смоговым слоем и непосредственно внутри него. Усиленное потепление, в свою очередь, увеличивает нисходящее длинноволновое излучение и нагревает поверхность Земли. Весной это воздействие достигает пика из-за концентраций черного углерода, перенесенных из загрязненных регионов-источников, хотя и летом оно может быть значительным по причине достигающих атмосферы Арктики выбросов, исходящих от северных лесных пожаров. Соответствующее повышение поверхностной температуры весной составляет около  $0.24^\circ\text{C}$ . Кроме того, весной, в пик воздействия, оседание черного углерода на снежные и ледовые поверхности, характеризующиеся высоким альбедо, сокращает отражательную способность этих поверхностей и приводит к положительному поверхностному воздействию в масштабе  $0.53 \text{ Втм}^{-2}$  (Флэннер и др., 2007 г.). Соответствующее повышение поверхностной температуры составляет примерно  $0.56^\circ\text{C}$ .

Наконец, прямое коротковолновое воздействие на климат аэрозольными атмосферными загрязнениями происходит в период активного поступления солнечного света, когда весенний арктический смог или дым от летних пожаров в северных лесах способствуют тому, что только часть солнечных лучей достигает поверхности Земли. Результатом является отрицательное поверхностное воздействие в весенний период ( $-0.72 \text{ Втм}^{-2}$  как показатель по «общей массе» аэрозольных загрязнений – выбросов от сжигания ископаемого топлива и биотоплива и сгорания биомассы) и понижение в температуре поверхности на  $-0.93^\circ\text{C}$ . Т.к. воздействие у поверхности является мгновенным воздействием, изменение температуры происходит прежде, чем восстанавливается температурное равновесие между поверхностью Земли и более теплой атмосферой. Дополнительно включаются такие эффекты как сокращение атмосферного давления на уровне моря и увеличение снежного или ледового покрова. Подобное воздействие аэрозолей на атмосферную циркуляцию и криосферу может способствовать некоему смещению реакции, или фазовой задержке, отмечающейся между пиковым периодом воздействия (весной и летом) и максимальной реакцией поверхностной температуры (зимой).

Стоит еще раз отметить уже описанное выше «рассогласование» между климатическим воздействием аэрозолей и поверхностной температурной реакцией, которое наблюдалось в нескольких исследованиях на климатических моделях и нашло отражение в данных в Табл. 3. Опубликованные недавно результаты исследований с моделированием показывают, что в ходе арктического лета температурные реакции у арктических поверхностей хорошо коррелируются либо с глобальным, либо с локальным воздействием (Шинделл, 2007 г.). Однако в течение остальных месяцев года температурная реакция происходит больше в ответ на глобальное воздействие либо воздействие, исходящее из нетропических широт северного полушария, нежели по причине локального арктического воздействия, что говорит о том, что краткосрочные загрязнители и вызываемое ими воздействие в удаленных регионах оказывают большое влияние на климат Арктики.

При рассмотрении сезонности воздействия и поверхностных температурных реакций в Арктике необходимо также учитывать условия, характерные именно для арктических широт. Например, в летний период

опосредованный эффект тропосферных аэрозолей дает наибольшее значение ВП, но также и наименьшее значение  $\Delta TП$ . Это расхождение возникает в силу того, что повышение температуры у поверхности арктических морей ограничивается присутствием морского льда. Наблюдаемый сценарий – расхождение между максимальными сезонными значениями воздействия и ответной температурной реакцией – вероятно, изменится в будущем, когда можно будет ожидать сокращения площадей морского льда.

На Рис. 14 проиллюстрировано сравнение температурных реакций арктических поверхностей на воздействие вызывающих потепление краткосрочных загрязнителей с температурными реакциями, возникающими на глобально распространенные парниковые газы. Данные приведены в зависимости от сезонных показателей. Несмотря на фактор приблизительности данных, влияющий на расчеты в исследованиях с моделированием и описанный в Разделе 3, та роль, которую краткосрочные загрязнители играют в наблюдаемом ускоряющемся потеплении в Арктике, представляется весьма значительной. На Рис. 13 отражены данные вычислений по охлаждению поверхности, происходящему за счет тропосферных аэрозолей. В масштабе осредненной посезонной динамики это охлаждение, по-видимому, «отводит» тот эффект потепления, который оказывают в Арктике концентрации краткосрочных загрязнителей. Некоторые источники загрязнителей, такие как сгорание биомассы, приводят к образованию смогового слоя, содержащего высокие концентрации органического углерода по отношению к черному углероду. В подобных случаях итоговой ответной реакцией на образование атмосферного смогового слоя может быть фактическое охлаждение. Однако результаты вычислений по моделированию прямого воздействия, показанные в Табл. 3, дают основания предполагать, что органический углерод, содержащийся в смоговом слое, дает почти нейтральную температурную реакцию, в то время как черный углерод приводит к положительной температурной реакции. Ситуация с температурными реакциями, наступающими вследствие опосредованного воздействия, не столь очевидна. Кроме того, картина может меняться при рассмотрении отдельных эпизодических явлений, нежели осредненной посезонной динамики. Например, кратковременный эпизод с резким повышением температуры вследствие поглощения солнечного излучения отложениями черного углерода на снежной или ледовой поверхности может привести к таянию в нелинейной климатической системе, на которое охлаждение, происходящее в то же время по причине смогового слоя в атмосфере, не окажет никакого влияния.

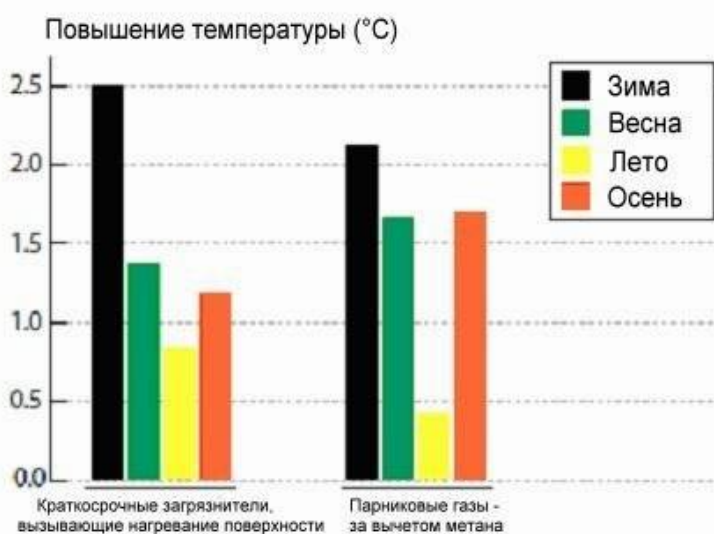


Рис. 14. Посезонная осредненная динамика температурных реакций у поверхности Земли, рассчитанная на регион между 60° и 90° северной широты, как следствие воздействия глобально распространенных парниковых газов (за вычетом метана), в сравнении с динамикой реакций на вызывающие нагревание поверхности краткосрочные загрязнители (для аэрозолей – воздействие через длинноволновую излучательную способность облаков, для черного углерода – атмосферное воздействие и воздействие через взаимосвязь снега и альбедо, для тропосферного озона – воздействие через парниковые газы и поглощение коротковолнового излучения, и для метана – воздействие через парниковые газы).

## 5. Негативные изменения в арктическом климате и возможности их минимизации как мы их понимаем сегодня

Сокращение глобальных выбросов углекислого газа приведет к необходимому уменьшению темпов нагревания арктических поверхностей и скорости таяния полярного снега и льда. Однако преимущество

урегулирования выбросов загрязнителей краткосрочного действия – наряду с сокращением выбросов CO<sub>2</sub> – заключается в том, что эффект, который такие меры окажут на климат Арктики, проявится в более скором будущем, нежели меры по сокращению выбросов углекислого газа. Наиболее эффективная политика минимизации последствий изменения климата в Арктике должна основываться на сокращении тех загрязнителей, которые играют доминирующую роль в процессе поглощения солнечного излучения поверхностью. Понимаемые нами сегодня возможности такой минимизации включают в себя следующие меры:

**Метан.** Сокращение выбросов метана потребует принятия мер в отношении таких крупных антропогенных источников метановых загрязнений, которые подлежат урегулированию. Благодаря относительно долгой продолжительности жизни метана в атмосфере, сокращение выбросов метана, происходящее в глобальном масштабе, может положительно отразиться на климате Арктики. Агентство по защите окружающей среды США (Environmental Protection Agency, EPA) рассмотрело основные антропогенные источники выбросов метана и идентифицировало направления работы, предлагающие большой потенциал для смягчения последствий изменений климата в Арктике. В эти направления входят дегазация угольных пластов и вентиляционное улавливание шахтного метана, определение подлежащих устранению и устранение утечек природного газа, а также усовершенствованная утилизация твердых бытовых отходов, включая использование метана, образующегося на мусорных полигонах, в качестве источника энергии. В глобальном масштабе на выбросы шахтного метана приходится 8% всех выбросов метана как следствия антропогенной деятельности (EPA, 2006 г.). Из разрабатываемых угольных шахт метан удаляется с помощью больших вентиляционных систем и также, в случае как разрабатываемых, так и заброшенных шахт, путем дегазации или установками дренирования газа. Шахтный метан можно улавливать и пускать в производство электроэнергии и тепла, а также использовать в других областях промышленного или производственного применения. Многие из перечисленных направлений урегулирования выбросов метана являются выгодными с коммерческой точки зрения.

**Озон и черный углерод – работа с регионами-источниками загрязнений.** Озон и черный углерод, в силу относительной короткой продолжительности жизни, не отличаются глобальным распространением в земной атмосфере. Следовательно, для уменьшения их воздействия на климат Арктики необходимо проводить работу непосредственно с теми регионами, которые являются источниками этих загрязнений. Исходя из временной шкалы переноса загрязнителей, там, где речь идет о сроках от нескольких дней до нескольких недель, северные территории евразийского континента оказываются наиболее серьезным источником загрязнений воздуха в Арктике, особенно нижних слоев ее тропосферы (Барри, 1986 г.; Клонецки и др., 2003 г.; Шарма и др., 2004 г.; Столь, 2006 г.). Таким образом, чтобы сократить концентрации исходных продуктов озона и черного углерода в нижних слоях арктической атмосферы, необходимо сократить выбросы загрязнителей именно в этих регионах. В случае загрязнителей, попадающих в верхние слои атмосферы Арктики, основными регионами-источниками загрязнений являются и северная Евразия, и также некоторые области Северной Америки и Азии (Клонецки и др., 2003 г.; Кох и Хансен, 2005 г.; Столь, 2006 г.). Следовательно, для значительного сокращения озона и черного углерода в верхних слоях тропосферы Арктики потребуются более масштабные меры по сокращению выбросов по всему северному полушарию. Корреляция, наблюдаемая между поверхностными температурными реакциями в Арктике и воздействием, происходящим по причине озонового загрязнения глобально и на нетропических широтах северного полушария, лишь подчеркивает необходимость сократить концентрации озона и в северном полушарии, и в глобальном масштабе, для успешной минимизации изменений климата в Арктике. Наконец, выбросы прекурсоров озона и черного углерода внутри самой Арктики должны быть сведены к минимуму, т.к. именно эти выбросы будут иметь непропорционально сильное воздействие на концентрации загрязнений, накапливаемые внутри арктического региона.

**Озон и черный углерод – работа с источниками выбросов.** Меры по сокращению выбросов метана, описанные выше, смогут уменьшить масштабы образования озона. Уменьшению концентраций озона будет также способствовать сокращение выбросов окислов азота, однако, в то же время сокращение концентраций NO<sub>x</sub> приведет к уменьшению содержания гидроксильного радикала, а он является основным поглотителем метана. Следовательно, климатически успешная стратегия сокращения озоновых концентраций с использованием инструментов урегулирования окислов азота должна также включать в себя меры по сокращению метана, летучих органических углеродных соединений неметанового ряда, и/или угарного газа. Угарный газ образуется в результате неполного сгорания углеродного топлива. Основным источником выбросов угарного газа являются автомобили с двигателями, работающими на бензине. Способы сокращения выбросов угарного газа включают в себя использование каталитических нейтрализаторов, прохождение регулярных осмотров и должное техническое обслуживание, а также производство бензинового топлива с кислородосодержащими добавками (EPA, 1993 г.). Большая часть антропогенных летучих органических углеродных соединений неметанового ряда выделяется в атмосферу при использовании транспортных средств и в ходе промышленных процессов, которые включают в себя применение растворителей – таких как покрытие поверхностей (краски), печать (чернила), нефтехимическая обработка. Выбор мер по сокращению выбросов НМЛОС зависит в каждом случае от конкретного химического состава. Такими мерами могут быть установка регулирующих устройств, например, печи сжигания или системы рекуперации растворителей, ограничения на объем растворителей, используемых в

производстве, и снижение испаряемости исходных НМЛОС-содержащих продуктов (ЕРА, 1999 г.). Помимо урегулирования выбросов, являющихся результатом транспортной и промышленной деятельности, эффективному сокращению угарного газа, НМЛОС и концентраций озона будет способствовать сокращение или полный запрет на сжигание сельскохозяйственных отходов в Восточной Европе и Северной Азии. Сокращение концентраций черного углерода потребует работы с источниками, ответственными за выбросы аэрозолей с высокой поглощающей способностью и при этом относительно низкой отражающей способностью (напр., применение двигателей внутреннего сгорания, работающих на дизельном топливе, а также печей и плит, используемых в жилых помещениях). Необходимо будет также принимать меры по сокращению «внутриарктических» выбросов черного углерода (напр., из генераторов) и меры по урегулированию выбросов от морских судов, оперирующих на арктических маршрутах (учитывая, особенно, вероятный рост судоходной деятельности в арктических морях, который последует за уменьшением площадей снежных и ледовых покровов в Арктике). Дополнительной мерой может послужить наложение ограничений на сжигание сельскохозяйственных отходов в Восточной Европе, с тем чтобы предотвратить выброс и отложение на арктических поверхностях концентраций черного углерода в весенний период, когда возрастает поступление солнечного света, а протяженность снежных и ледовых покровов остается значительной. Немаловажным преимуществом сокращения выбросов озона и черного углерода будет также улучшение качества воздуха и снижение вреда, наносимого этими загрязнителями здоровью населения.

## 6. Будущие направления исследований

Большая часть того воздействия, которое загрязнители краткосрочного действия оказывают на климат Арктики, остается малоизученной и плохо поддается количественному описанию. Недостаток научного понимания этого воздействия становится очевидным в свете значительного разброса возможных значений, вычисляемых для различных процессов воздействия в ходе исследований с одной или несколькими моделями симуляции климатических процессов, как было показано в Разделе 3. В данном докладе приводятся результаты исследования Патриции Куинн (Куинн и др., 2008 г.) – итоги первого исследования, давшего посезонные осредненные оценки воздействия целого ряда различных химических агентов и вызываемых ими температурных реакций, вычисленные конкретно для арктического региона. Поскольку работа Куинн явилась только первой попыткой подобного рода, многое еще предстоит сделать для того, чтобы более корректно оценить воздействие каждого загрязнителя на арктический климат и определить эффективные стратегии по минимизации последствий. Ниже приведены конкретные научные проблемы и области поиска, требующие дополнительного изучения:

**Метан.** Чрезвычайно малоисследованными остаются выбросы метана из болотистых территорий в Арктике и субарктических регионах и из отложений гидрата метана в Арктике, происходящие по причине повышения температуры поверхности Земли. Более точная количественная оценка этих выбросов и той динамики изменений, которой можно ожидать от этих выбросов вследствие повышения температуры в ближайшем будущем, абсолютно необходима для понимания влияния метана на климат Арктики в частности и на климат Земли в глобальном масштабе.

**Озон.** Остается неизвестным, насколько эффективными могут быть меры по урегулированию выбросов окислов азота в близких к Арктике регионах и внутри самой Арктики с целью сокращения концентраций тропосферного озона в арктической атмосфере. Вероятно, локальные выбросы  $\text{NO}_x$  начнут играть большую роль с ожидаемым в будущем ростом судоходной деятельности в арктических морях. Необходимы дальнейшие исследования с тем, чтобы улучшить наше понимание химических процессов, связанных с образованием азотных соединений, и окислительной способности арктической атмосферы. Кроме того, дополнительного изучения требует глобальное воздействие озона и его влияние на климат Арктики.

**Черный углерод.** Доступное нам на сегодня понимание процессов оседания углеродосодержащих аэрозолей и динамики атмосферных концентраций черного углерода ограничивается недостатком измерений как в географическом, так и в историческом масштабе. Вопросы, возникающие в отношении источников загрязнения, переноса и атмосферных процессов, затрагивающих черный углерод и другие тропосферные аэрозоли, остаются пока что неразрешимыми – большей частью, в силу скудости исторических и современных данных по количественному определению аэрозольных концентраций в арктических регионах. Необходимо провести всеохватывающие измерения атмосферных и поверхностных концентраций черного углерода одновременно и по всей территории Арктики, вкупе с модельными исследованиями, с тем чтобы идентифицировать источники загрязнений – особенно те, что играют серьезную роль во временных сроках и темпах таяния снега и льда, – и чтобы получить более ясную картину путей переноса и процессов оседания черного углерода на поверхности. Недавние измерения черного углерода и изотопных индикаторов, проведенные с использованием кернов льда из Гренландии, показали, насколько эффективным может быть этот метод для того, чтобы определить, из каких регионов-источников концентрации черного углерода поступали в изучаемый участок Арктики за последние 200 лет (Макконнелл и др., 2007 г.; Макконнелл и Эдвардс, 2008 г.). Подобные исследования на других участках Арктики, где возможно извлечение ледовых кернов, будут крайне важны для получения информации о том, какие различия существуют в поступлении концентраций черного углерода в те или иные области Арктики из конкретных регионов-источников, а также о том, какие изменения происходили в загрязнении Арктики черным углеродом в результате выбросов в

современный период и прошлые эпохи. Эту информацию можно будет в дальнейшем использовать для анализа инвентарных данных о выбросах, применяемых в глобальных моделях циркуляции аэрозолей и для оценки эффективности этих моделей.

Сравнительный анализ шестнадцати глобальных аэрозольных моделей показал, что унификация одних только источников аэрозольных загрязнений имеет небольшое значение для различий в вычисляемых нагрузках загрязняющих веществ в атмосфере Земли (Текстор и др., 2007 г.). Определение того количества черного углерода, которое, предположительно, скопилось в Арктике, зависит, скорее, от данных по вертикальному перемешиванию, меридиональному переносу и выносу аэрозольных концентраций, обработка которых варьируется от модели к модели (Текстор и др., 2006 г.; Текстор и др., 2007 г.). Необходимо получить точные данные по количеству атмосферного черного углерода (или поглощению света аэрозолями) по всей Арктике и в вертикальном разрезе для того, чтобы оценить моделируемые процессы переноса и выхода аэрозолей из атмосферы. В проверке эффективности моделей могут также помочь спутниковые наблюдения вертикального и горизонтального распределения аэрозольных концентраций.

Данные по аэрозолям, полученные в исследованиях кернов льда датированием с высоким разрешением, дают возможность оценить процессы переноса и выхода аэрозолей, имитированные в модельных экспериментах, как и инвентарные данные по выбросам, а также дополнить современные данные измерений атмосферных аэрозолей более ранней по времени исторической информацией (напр., Сируа и Барри, 1999 г.)

***Другие тропосферные аэрозоли – нагревание поверхности.*** Увеличение длинноволновой излучательной способности тонких арктических облаков жидкой фазы вследствие взаимодействия с концентрациями антропогенных аэрозолей может привести к значительному повышению температуры поверхности в Арктике. Такое повышение будет происходить синхронно с таянием морского льда, с потенциальным риском резонансного усиления. В случае черного углерода, необходимо провести измерительные исследования вкупе с имитационным моделированием для того, чтобы определить регионы-источники загрязнения, химический состав и воздействие, которое различные типы аэрозолей оказывают на климат. Особое значение имеют измерения на участках с оборудованием для исследования радиационных процессов, т.к. они позволяют получить для дальнейшей работы информацию о свойствах аэрозолей и облаков, влиянии аэрозолей на характеристики облаков и конечном воздействии аэрозолей на радиационный баланс. Кроме того, требуются дальнейшие исследования для того, чтобы понять роль аэрозольных концентраций в образовании льда в низкоярусных облаках смешанной фазы.

***Другие тропосферные аэрозоли – охлаждение поверхности.*** Отражающая способность аэрозолей в атмосферных слоях не позволяет поступающему солнечному излучению достигнуть поверхности Земли, в результате чего поверхность начинает охлаждаться. Таким образом, сокращение аэрозольных концентраций в Арктике и в удаленных регионах-источниках загрязнителей может способствовать арктическому потеплению (Шинделл, 2007 г.). Необходимо понять весь спектр воздействия тропосферных аэрозолей на атмосферу Арктики (как прямое, так и опосредованное воздействие, оказываемое аэрозолями) с тем, чтобы выяснить, каким образом сокращение аэрозольных концентраций отразится на климате Арктики.

***Ответные климатические реакции.*** До сих пор очень слабо изучены механизмы обратной связи, действующие в арктическом климате под влиянием всего комплекса различных сил воздействия, оказываемого разнообразными загрязнителями, а также сам самый сложный организм, каким является окружающая среда Арктики. Моделирование остается единственным инструментом оценки климатических реакций на механизмы обратной связи и на отдельные эффекты воздействия, а также сочетания этих эффектов. Кроме того, моделирование необходимо для выработки прогнозов по возможному климатическому воздействию краткосрочных загрязнителей в перспективе ближайших десятилетий.

Измерения, упомянутые выше, послужат цели определения более точных границ в данных, используемых в моделях, таким образом, повышая их надежность как инструментов прогнозирования и улучшая наше понимание чувствительности климата к воздействиям загрязнителей. Дальнейшее усовершенствование моделей для более полного понимания механизмов обратной связи и климатических реакций должно включать в себя более точную параметризацию отражательной способности снега и взаимосвязи между аэрозолями и облаками смешанной фазы, исследования, которые позволили бы распознавать различные механизмы воздействия и механизмы обратной связи внутри климатической системы, а также сравнительные исследования по ряду моделей, направленные конкретно на получение точных данных о выбросах, переносе загрязнителей и тех атмосферных процессах, которые влияют на климат арктических территорий.

***Стратегии борьбы с негативными последствиями.*** Необходимы дальнейшие модельные исследования с тем, чтобы определить эффективность тех или иных методов смягчения негативных последствий воздействия краткосрочных загрязнителей для арктического климата и, в частности, в отношении поверхностных температурных реакций. Выбор конкретных стратегий действия остается непростым, т.к. каждый источник загрязнения дает выход целому ряду химических соединений (напр., при лесных пожарах в атмосферу уходят черный углерод, органический углерод и озон). Для точной оценки того влияния, которое конкретные митигационные стратегии могут оказать на климат Арктики, необходимо иметь в виду одновременное сокращение выбросов всех химических элементов из того или иного источника загрязнений.

***Наиболее вероятные области научного поиска в перспективе ближайших двух лет.*** В ходе

дискуссии, состоявшейся по проблемам загрязнителей краткосрочного действия и их воздействия на климат Арктики в ноябре 2007 г. (мероприятие было организовано силами Норвежского института исследований воздуха (Norsk Institutt for Luftforskning, NILU), Международного проекта по глобальной атмосферной химии (International Global Atmospheric Chemistry project, IGAC), Рабочей группы по чистому воздуху (Clean Air Task Force, CATF) и Центра климатического прогнозирования Национальной метеорологической службы США (National Weather Service's Climate Prediction Center, CPC)), был составлен следующий перечень научных задач, которые предстоит решить исследователям климатических проблем Арктики в ближайшие два года:

- Определить, с целью наиболее оптимального сокращения выбросов загрязнителей краткосрочного действия, возможности по уменьшению загрязнений в зависимости от конкретной сезонной динамики, регионов-источников и секторов.
- Усовершенствовать знания по источникам черного углерода, выбросы из которых приводят к отложению концентраций черного углерода в Арктике в зимний и весенний период.
- Провести модельные эксперименты для определения эффективности различных митигационных стратегий для климата Арктики.
- Определить масштаб воздействия загрязнителей краткосрочного действия на криосферу Арктики, в особенности, в тех регионах, где процесс таяния проходит наиболее интенсивно (Западная Сибирь).
- Определить и обосновать продолжительность жизни черного углерода после оседания на поверхности многолетнего снега и льда в Арктике, а также его воздействие на процессы таяния.
- Определить воздействие на климат бореальных лесных пожаров как в глобальном, так и в местном, арктическом масштабе.
- Оценить роль загрязнителей краткосрочного действия в потеплении в верхних широтах периода начала XX века.
- Оценить воздействие на арктический климат выбросов загрязнителей краткосрочного действия, происходящих в результате роста судоходной деятельности и разработки месторождений ископаемых ресурсов в Арктике.
- Оценить относительную роль загрязнителей краткосрочного действия и вызываемого ими воздействия (включая воздействие на облака) на поверхностный тепловой баланс Арктики.

***Дополнительные задачи для дальнейшей работы:***

- Подкреплять исследования, направленные на идентификацию конкретных источников воздействия, более полным анализом существующих данных и климатическим моделированием в региональном масштабе (как прямым, так и обратным).
- Создать мониторинговую сеть для отслеживания воздействия краткосрочных аэрозольных загрязнителей в Арктике, которая обеспечила бы соответствующее пространственное разрешение и была бы привязана к нуждам модельных исследований для дальнейшего усовершенствования и качественной оценки экспериментов с моделированием. Эти меры потребуют улучшения измерительной мощности работающих станций, увеличения числа самих исследовательских станций и обеспечения необходимого измерительного оборудования для новых станций. Требуемые области измерений для дальнейшей работы включают в себя измерения по химическому составу аэрозолей для выявления информации об антропогенных и природных источниках концентраций (напр., данные по сульфатам, нитратам, органическому углероду, черному углероду, пыли и морской соли) и измерения оптических и радиационных свойств аэрозолей для оценки их воздействия на климат (напр., данные по светорассеянию и поглощению светового излучения, а также по аэрозольной оптической толщине).
- Расширить существующую сеть станций (см. <http://gaw.kishou.go.jp/wdcdgg/>), где проводятся измерения концентраций метана и изотопного состава. Будущая сеть должна быть с достаточно широким охватом и достаточным числом станций, чтобы дать возможность получать данные инвентаризации по природным и антропогенным выбросам метана в национальных масштабах, улучшить понимание процессов, в ходе которых образуются выбросы метана, и определить более четкие границы для обратного моделирования метанового баланса. В рамках исследований, проводимых станциями сети, измерения для идентификации источников происхождения метана должны проходить по ряду изотопных индикаторов, включая стабильные изотопы углерода и водорода. Длительные измерения содержания метана с помощью вышек с датчиками для сбора данных и измерения различных индикаторов в вертикальных профилях дискретной выборки должны быть необходимыми компонентами функционирования сети. Важно, чтобы у научного сообщества были возможности быстрого доступа к данным по результатам работы измерительных программ, и чтобы государства обеспечили более благоприятные таможенные условия для оформления транспортировки с целью обмена пробами воздуха между странами.
- Осуществление стратегий по уменьшению воздействия черного углерода, поступающего в Арктику, требует большей уверенности в данных мониторинга уровней концентраций черного углерода в Арктике. Для этой цели необходимо обеспечить адекватность измерительных методологий на каждой из исследовательских станций. На настоящий момент непрерывные измерения

концентраций черного углерода в Арктике проводятся четырьмя исследовательскими станциями в следующих пунктах: Барроу (Аляска, США), Нью-Олесунд (Свальбард, Норвегия), Алерт (Нунавут, Канада) и Саммит (Гренландия). На станциях используются несколько различных подходов к измерительным и оценочным исследованиям по черному углероду. Некоторые методики основаны непосредственно на исследованиях черного углерода, такие как анализ теплопоглощения в пробах черного углерода, отобранных с помощью фильтров, тогда как в других используются наблюдения по косвенным показателям для получения информации о черном углероде. В нескольких случаях применяются измерения распределения частиц черного углерода по размерам. Такое разнообразие методик рождает потенциальный риск относительно высокой приблизительности данных измерений. Обеспечение научной уверенности в том, что изменения в данных по концентрациям черного углерода, получаемых на каждой из четырех исследовательских станциях, достоверно отражают картину изменений в концентрациях по всей Арктике, требует основательной программы систематического сравнения получаемых сведений. Такая программа должна функционировать в рамках протокола, разработанного для измерений черного углерода Глобальной службой атмосферы Всемирной Метеорологической Организации (World Meteorological Organization's Global Atmosphere Watch, WMO GAW). Параметры точности и достоверности данных по черному углероду, получаемых на каждой исследовательской станции, должны соответствовать нормам и рекомендациям по аэрозольным измерениям, также выработанным Глобальной службой атмосферы (см. <http://www.nilu.no/projects/ccc/manual/download/gaw153.pdf>). Предварительной основой для программы сравнительного анализа методик сбора данных по черному углероду могут послужить материалы Рабочего заседания WMO GAW по Сравнительному анализу нефелометров и оборудования по измерению абсорбции, состоявшегося в Лейпциге в марте 2007 г.. Дальнейшая разработка и функционирование программы сравнительного анализа по измерениям черного углерода должны стать ответственностью координаторов измерительных исследований на каждой из упомянутых арктических станций.

- Определить пределы изменчивости паттернов синоптического переноса в Арктику от года к году, в контексте исторических и прогнозируемых изменений в паттернах атмосферных перемещений как следствия изменений климата, с тем чтобы усовершенствовать имеющиеся данные для разработки основы будущих митигационных стратегий.

Часть научных изысканий по упомянутым направлениям уже осуществляется в ходе работы, проводимой в рамках Международного полярного года (International Polar Year), однако, дополнительные усилия потребуются для решения прочих научных задач, стоящих перед исследователями климатических изменений в Арктике на сегодняшний день.

**Благодарности.** Немалая часть данного доклада стала результатом дискуссий, состоявшихся в ходе рабочих совещаний по воздействию краткосрочных загрязнителей на климат Арктики, организованных при содействии Национального управления по авиации и исследованию космического пространства США, Рабочей группы по чистому воздуху, Норвежского института исследований воздуха, Международного проекта по глобальной атмосферной химии, и Центра климатического прогнозирования Национальной метеорологической службы США. Авторы также благодарят Национальное управление по океану и атмосфере США и Департамент по окружающей среде Канады (Environment Canada) за предоставленные данные по длительным наблюдениям на арктических станциях в Соединенных Штатах и Канаде.

## Использованная литература

- ACIA (Оценка воздействий изменения климата в Арктике), «Эффекты потепления в Арктике», изд-во Университета Кембридж, Кембридж, Великобритания, 2004 г. – Arctic Climate Impact Assessment (ACIA), Impacts of a warming Arctic, Cambridge University Press, Cambridge.
- EPA (Environmental Protection Agency, Агентство по защите окружающей среды США), «Автомобили и угарный газ», EPA 400-F-92-005, 1993 г. – US EPA, 1993. Automobiles and Carbon Monoxide, EPA 400-F-92-005.
- EPA (Environmental Protection Agency, Агентство по защите окружающей среды США), «Контроль за летучими органическими соединениями», EPA/452/B-02-001, 1999 г. – US EPA, 1999. VOCs Controls, EPA/452/B-02-001.
- EPA (Environmental Protection Agency, Агентство по защите окружающей среды США), «Глобальная минимизация последствий выбросов неуглекислых парниковых газов», EPA 430-R-06-005, 2006 г. – US EPA, 2006. Global Mitigation of Non-CO2 Greenhouse Gases, EPA 430-R-06-005.
- NSIDC (Национальный центр исследований снега и льда), «Сокращение морского льда Арктики бьет все рекорды», Бюллетень новостей центра NSIDC по морскому льду Арктики за осень 2007 г., 1 окт. 2007 г. – National Snow and Ice Data Center (NSIDC), Arctic sea ice shatters all previous record lows, NSIDC Arctic Sea Ice News Fall 2007, 1 October 2007.
- Барри (Л. А. Барри), «Загрязнение воздуха в Арктике – Обзор данных, известных на сегодняшний день»,

журнал «Экология атмосферы», вып. 20, сс. 643-663, 1986 г. – Barrie, L. A.: Arctic air pollution—An overview of current knowledge, *Atmos. Environ.*, 20, 643-663, 1986.

Альбрехт (Б. А. Альбрехт), «Аэрозоли, микрофизика облаков и переменная облачность», журнал «Наука», вып. 245, сс. 1227-1230, 1989 г. – Albrecht, B.A., *Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness*, *Science*, 245, 1227-1230, 1989.

Брювайлер и Мэттьюс (Л. М. Брювайлер и И. Мэттьюс), «Преодоление противоречий между сегодняшним пониманием динамики баланса атмосферного метана за последние десятилетия и данными атмосферных наблюдений», издание «Эос – Научные труды Американского геофизического союза», вып. 88 (52), краткая презентация с осенней встречи 2007 г., № B52C-03, 2007 г. – Bruhwiler, L.M. and E. Matthews, Can we reconcile our understanding of the atmospheric methane budget over the past decades with atmospheric observations? *EOS Trans. AGU*, 88, (52), Fall Meet. Suppl. Abstract B52C-03, 2007.

Бьорк и Молау (Р. Г. Бьорк и У. Молау), «Экология горных снежников и воздействие глобального изменения климата», журнал «Арктические, антарктические и горные исследования», вып. 39, сс. 34-43, 2007 г. – Björk, R. G. and U. Molau, *Ecology of alpine snowbeds and the impact of global change*, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 39, 34-43, 2007.

Гарретт и др. (Т. Дж. Гарретт, Ч. Чжао, С. Донг, Дж. Дж. Мейс, П. В. Хоббс), «Воздействие различных аэрозольных режимов на слоистые облака низкого яруса арктической атмосферы», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 31, doi:10.1029/2004GL019928, 2004 г. – Garrett, T.J., C. Zhao, X. Dong, G.G. Mace, and P.V. Hobbs, Effects of varying aerosol regimes on low-level Arctic stratus, *Geophys. Res. Lett.*, 31, doi:10.1029/2004GL019928, 2004.

Гарретт и Чжао (Т. Дж. Гарретт и Ч. Чжао), «Повышенная длинноволновая излучательная способность арктических облаков в свете загрязнения, исходящего со средних широт», журнал «Природа», вып. 440, сс. 787-789, 2006 г. – Garrett, T.J. and C. Zhao, Increased Arctic cloud longwave emissivity associated with pollution from mid-latitudes, *Nature*, 440, 787-789, 2006.

Гранье и др. (К. Гранье, У. Нимайер, Й. Х. Юнгклаус, Л. Эммонс, П. Дж. Хесс, Ж.-Ф. Ламарк, С. Уолтерс, Г. П. Брассер), «Рост озонового загрязнения как следствие предстоящего роста объемов судоходства в арктических акваториях», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 33, L13807, doi:10.1029/2006GL026180, 2006 г. – Granier, C., U. Niemeier, J. H. Jungclaus, L. Emmons, P. G. Hess, J.-F. Lamarque, S. Walters, and G. P. Brasseur, Ozone pollution from future ship traffic in the Arctic northern passages, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L13807, doi:10.1029/2006GL026180, 2006.

Дентнер и др. (Ф. Дентнер, Д. Стивенсон, Дж. Кофала, Р. Мехлер, М. Аманн, П. Бергамасчи, Ф. Раэс, Р. Дервент), «Влияние инструментов урегулирования загрязнителей воздуха и выбросов метана на тропосферный озон и радиационное воздействие – Исчисления, полученные моделированием атмосферных потоков и химических реакций на период с 1990 по 2030 гг.», журнал «Химия и физика атмосферы», вып. 5, сс. 1731-1755, 2005 г. – Dentener, F., D. Stevenson, J. Cofala, R. Mechler, M. Amann, P. Bergamaschi, F. Raes, and R. Derwent, The impact of air pollutant and methane emission controls on tropospheric ozone and radiative forcing: CTM calculations for the period 1990 – 2030, *Atm. Chem. Phys.*, 5, 1731-1755, 2005.

Дженеросо и др. (С. Дженеросо, И. Беи, Ж.-Л. Аттье, Ф.-М. Бреон), «Анализ лесных пожаров в России 2003 г. и их воздействие на климат Арктики – спутниковые наблюдения и расчеты моделирования», «Журнал геофизических исследований», вып. 112, D15302, doi:10.1029/2006JD008344, 2007 г. – Generoso, S., Bey, I., Attie, J.-L., and Breon, F.-M.: A satellite- and model-based assessment of the 2003 Russian fires: Impact on the Arctic region, *J. Geophys. Res.*, 112, D15302, doi:10.1029/2006JD008344, 2007.

Джонсон и др. (Д. Джонсон, К. Джонсон, Дж. М. Уорд, М. Бранин), «Жвачные и другие животные», см. в Касишке и др. (Э. С. Касишке, Э. Дж. Хайер, П. К. Новелли, П. Брювайлер, Н. Френч, А. И. Сухинен, Дж. Х. Хьюсон, Б. Дж. Стокс), «Влияние выбросов северных лесных пожаров на содержание атмосферного углерода и угарного газа в северном полушарии», журнал «Глобальные биохимические циклы», вып. 19, GB1012, doi:10.1029/2004GB002300, 2005 г. – Johnson, D., K. Johnson, G.M. Ward, and M. Branine, Ruminants and other animals. In Kasischke, E.S., E.J. Hyer, P.C. Novelli, P. Bruhwiler, N. French, A.I. Sukhinen, J.H. Hewson, and B.J. Stocks, Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide, *Global Biogeochem. Chem. Cycles*, 19, GB1012, doi:10.1029/2004GB002300, 2005.

Длугокенски и др. (Э. Дж. Длугокенски, С. Хувелинг, Л. Брювайлер, К. А. Мазари, П. М. Ланг, Дж. Б. Миллер, П. П. Танс), «Остановка в динамике содержания атмосферного метана – Временная пауза или новая реальность?», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 30, doi:10.1029/2003GL018126, 2003 г. – Dlugokencky, E.J., S. Houweling, L. Bruhwiler, K.A. Masarie, P.M. Lang, J.B. Miller, and P.P. Tans, Atmospheric methane levels off: Temporary pause or new steady-state? *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi:10.1029/2003GL018126, 2003.

Жирар и др. (Е. Жирар, Ж. П. Бланше, И. Дюбуа), «Влияние сернистых аэрозолей в арктической атмосфере на кристаллы низоярусного атмосферного льда, влажность и температуру в зимний период – Данные по наблюдениям у Алерта, Нунавут», журнал «Атмосферные исследования», вып. 73, сс. 131-148, 2005 г. – Girard, E., J.P. Blanchet, and Y. Dubois, Effects of Arctic sulfuric acid aerosols on wintertime low-level atmospheric ice crystals, humidity and temperature at Alert, Nunavut, *Atm. Res.*, 73, 131-148, 2005.

Зайнфельд (Дж. Х. Зайнфельд), «Модели качества воздуха с озоновым содержанием – Критическое обозрение», «Журнал Ассоциации по контролю над качеством воздуха», вып. 38, сс. 616-645, 1988 г. –

- Seinfeld, J.H., Ozone air quality models: A critical review, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 38, 616-645, 1988.
- Зимов и др. (С. А. Зимов, Е. А. Г. Шуур, Ф. С. Чапин III), «Изменение климата: Вечная мерзлота и глобальное содержание углекислого газа», журнал «Наука», вып. 312, сс. 1612-1613, 2006 г. – Zimov, S. A., E.A.G. Schuur, and F. S. Chapin III, Climate change: Permafrost and the global carbon budget, *Science*, 312, 1612-1613, 2006.
- Зуолли и др. (Х. Дж. Зуолли, В. Абдалати, Т. Херринг, К. Ларсон, Дж. Саба, К. Стеффен). «Поверхностное смещение ледников Гренландии вследствие таяния», журнал «Наука», вып. 297, сс. 218-222, 2002 г. – Zwally, H.J., W. Abdalati, T. Herring, K. Larson, J. Saba, and K. Steffen, Surface melt-induced acceleration of Greenland ice-sheet flow, *Science*, 297, 218 - 222, 2002.
- Зюндквист и др. (М. К. Зюндквист, Р. Дж. Бьорк, У. Молау), «Укоренение северных лесных видов в альпийских кустарниковых пустошах в субарктической Швеции», журнал «Экология и разнообразие растений», вып. 1, сс. 67-75, 2008 г. – Sundqvist, M.K., R.G. Björk, and U. Molau, Establishment of boreal forest species in alpine dwarf-shrub heath in subarctic Sweden, *Plant Ecology and Diversity*, 1, 67-75, 2008.
- Иверсен и Йорангер (Т. Иверсен и А. Йорангер), «Загрязнение воздуха в Арктике и крупные атмосферные потоки», журнал «Экология атмосферы», вып. 19, сс. 2099-2108, 1985 г. – Iversen, T. and E. Joranger, Arctic air pollution and large scale atmospheric flows, *Atmos. Environ.*, 19, 2099-2108, 1985.
- Као и др. (М. Као, К. Грегсон, С. Маршалл), «Глобальные выбросы метана и их чувствительность к изменениям климата», журнал «Экология атмосферы», вып. 32, сс. 3239-3299, 1998 г. – Cao, M., K. Gregson, and S. Marshall, Global methane emissions and its sensitivity to climate change, *Atm. Env.*, 32, 3293-3299, 1998.
- Касишке и др. (Э. С. Касишке, Э. Дж. Хайер, П. К. Новелли, П. Брювайлер, Н. Френч, А. И. Сухинен, Дж. Х. Хьюсон, Б. Дж. Стокс), «Влияние выбросов северных лесных пожаров на содержание атмосферного углерода и угарного газа в северном полушарии», журнал «Глобальные биохимические циклы», вып. 19, GB1012, doi:10.1029/2004GB002300, 2005 г. – Kasischke, E.S., E.J. Hyer, P.C. Novelli, P. Bruhwiler, N. French, A.I. Sukhinen, J.H. Hewson, and B.J. Stocks, Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide, *Global Biogeochem. Chem. Cycles*, 19, GB1012, doi:10.1029/2004GB002300, 2005.
- Киэл и др. (Дж. Т. Киэл, К. А. Шилдс, Дж. Дж. Хэк, У. Коллинз), «Климатическая чувствительность в Общей модели климатических систем, версия 3 (Community Climate System Model, Version 3)», журнал «Климат», вып. 19, сс. 2854-2596, 2006 г. – Kiehl, J.T., C.A. Shields, J.J. Hack, and W. Collins, The climate sensitivity of the Community Climate System Model: CCSM3, *J. Climate*, 19, 2854-2596, 2006.
- Киэл (Дж. Т. Киэл), «Реагирование климатической модели двадцатого века и чувствительность климата», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 34, L22710, doi:10.1029/2007GL031383, 2007 г. – Kiehl, J.T., Twentieth century climate model response and climate sensitivity, *Geophys. Res., Lett.*, 34, L22710, doi:10.1029/2007GL031383, 2007.
- Кирхгесснер (Д. А. Кирхгесснер, С. Д. Пиккот, Дж. Д. Уинклер), «Оценка глобальных выбросов метана из угольных шахт», журнал «Хемосфера», вып. 26, сс. 453-472, 1993 г. – Kirchgessner, D.A., S.D. Piccot, and J.D. Winkler, Estimate of global methane emissions from coal mines, *Chemosphere*, 26, 453-472, 1993.
- Кларк и Нун (А. Д. Кларк и К. Дж. Нун), «Сажа в арктической снежной массе – причина нарушений в лучистом переносе», журнал ««Экология атмосферы», вып. 19, сс. 2045-2053, 1985 г. – Clarke, A.D. and K.J. Noone, Soot in the Arctic snowpack: a cause for perturbations in radiative transfer, *Atmos. Environ.*, 19, 2045-2053, 1985.
- Клонецки и др. (А. Клонецки, П. Хесс, Л. Эммонс, Л. Смит, Дж. Орландо, Д. Блейк), «Сезонные изменения в перемещении загрязнителей в тропосферу Арктики (исследование на модели)», «Журнал геофизических исследований», вып. 108(D4), 8367, doi:10.1029/2002JD002199, 2003 г. – Klonecki, A., P. Hess, L. Emmons, L. Smith, J. Orlando, and D. Blake: Seasonal changes in the transport of pollutants into the Arctic troposphere—Model study, *J. Geophys. Res.*, 108(D4), 8367, doi:10.1029/2002JD002199, 2003.
- Коронци и др. (С. Коронци, Дж. Маккарти, Т. Лобода, С. Кумар, К. Джастис), «Глобальное распространение статистики сжигания пожнивных остатков на пахотных площадях: Исследование по данным, полученным сканирующим спектрорадиометром среднего разрешения (MODIS)», журнал «Глобальные биохимические циклы», вып. 20, GB2021, doi:10.1029/2005GB002529, 2006 г. – Korontzi, S., McCarty, J., Loboda, T., Kumar, S., and Justice, C.: Global distribution of agricultural fires in croplands from 3 years of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data, *Global Biogeochem. Cycles*, 20, GB2021, doi:10.1029/2005GB002529, 2006.
- Кох и Хансен (Д. Кох и Дж. Хансен), «Удаленные источники арктического черного углерода – Эксперимент с моделью ModelE в Институте космических исследований Годдарда», «Журнал геофизических исследований», вып. 110, D04204, doi:10.1029/2004JD005296, 2005 г. – Koch, D. and J. Hansen, Distant origins of Arctic black carbon: A Goddard Institute for Space Studies ModelE experiment, *J. Geophys. Res.*, 110, D04204, doi:10.1029/2004JD005296, 2005.
- Кох и др. (Д. Кох, Т. С. Бонд, Д. Стритс, Н. Унгер, Г. Р. Ван дер Верф), «Глобальное воздействие аэрозолей, происходящих из различных регионов и секторов-источников», «Журнал геофизических исследований», вып. 112, D02205, doi:10.1029/2005JD007024, 2007 г. – Koch, D., T.C. Bond, D. Streets, N. Unger, and G.R. van der Werf, Global impacts of aerosols from particular source regions and sectors, *J. Geophys. Res.*, 112, D02205, doi:10.1029/2005JD007024, 2007.

Кристенсен и др. (Т. Р. Кристенсен, Т. Йоханссон, Й. Окерман и др.), «Таяние субарктической вечной мерзлоты и его воздействие на растительность и выбросы метана», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 31, doi:10.1029/2003GL018680, 2004 г. – Christensen, T.R., T. Johansson, J. Akerman, et al., Thawing sub-arctic permafrost : Effects on vegetation and methane emissions, *Geophys. Res. Lett.*, 31, doi:10.1029/2003GL018680, 2004.

Крутцен, (П. Крутцен), «Разбор химических свойств некоторых второстепенных компонентов стратосферы и тропосферы », журнал «Теоретическая и прикладная геофизика», вып. 106-108, сс. 1385-1399, 1973 г. – Crutzen, P., A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere, *Pure Appl. Geophys.*, 106-108, 1385-1399, 1973.

Куинн и др. (П. К. Куинн, Дж. Шоу, Э. Эндрюс, Э. Дж. Даттон, Т. Руохо-Айрола, С. Л. Гонг), «Арктический смог: Наблюдаемая динамика и недостаток данных», журнал «Теллус», серия В, «Химия и физика в метеорологии», вып. 59, сс. 99-114, 2007 г. – Quinn, P.K., G. Shaw, E. Andrews, E.G. Dutton, T. Ruoho-Airola, S.L. Gong, Arctic Haze: Current trends and knowledge gaps, *Tellus*, 59B, 99-114, 2007.

Куинн и др. (П. К. Куинн, Т. С. Бейтс, Э. Баум, Н. Даблдей, А. Фьоре, М. Флэннер, А. Фридлинд, Т. Дж. Гарретт, Д. Кох, С. Менон, Д. Шинделл, А. Столь, С. Дж. Уоррен), «Загрязнители краткосрочного действия в Арктике: Их климатическое воздействие и возможные стратегии его минимизации», журнал «Химия и физика атмосферы», вып. 8, сс. 1723-1735, 2008 г. – Quinn, P.K., T.S. Bates, E. Baum, N. Doubleday, A. Fiore, M. Flanner, A. Fridlind, T. Garrett, D. Koch, S. Menon, D. Shindell, A. Stohl, and S.G. Warren, Short-lived pollutants in the Arctic: Their climate impact and possible mitigation strategies, *ACP*, 8, 1723-1735, 2008.

Любин и Фогельманн (Д. Любин и Э. М. Фогельманн), «Климатологически значимый опосредованный длинноволновой эффект воздействия аэрозолей в Арктике», журнал «Природа», вып. 439, сс. 453-456, 2006 г. – Lubin, D. and A.M. Vogelmann, A climatologically significant aerosol longwave indirect effect in the Arctic, *Nature*, 439, 453-456, 2006.

Любин и Фогельманн (Д. Любин и Э. М. Фогельманн), «Ожидаемый масштаб опосредованного коротковолнового эффекта воздействия аэрозолей на арктические облака с высоким содержанием жидко-капельной влаги в весенний период», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 34, doi:10.1029/2006GL028750, 2007 г. – Lubin, D. and A.M. Vogelmann, Expected magnitude of the aerosol shortwave indirect effect in springtime Arctic liquid water clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 34, doi:10.1029/2006GL028750, 2007.

Макконнелл и др. (Дж. Р. Макконнелл, Р. Эдвардс, Г. Л. Кок и др.), «Промышленные выбросы черного углерода и изменение картины воздействия на климат Арктики в XX-м веке», журнал «Наука», вып. 317, сс. 1381-1384, 2007 г. – McConnell, J.R., R. Edwards, G.L. Kok, et al., 20th century industrial black carbon emissions altered Arctic climate forcing, *Science*, 317, 1381-1384, 2007.

Макконнелл и Эдвардс (Дж. Р. Макконнелл и Р. Эдвардс), «Сжигание угля и ядовитое наследие тяжелых металлов в Арктике», Протоколы Национальной академии наук США, вып. 105, сс. 12140-12144, 2008 г. – McConnell, J.R. and R. Edwards, Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, in press, 2008.

Маккрекен и др. (М. К. Маккрекен, Р. Д. Сесс, Дж. Л. Поттер), «Воздействие на климат антропогенных аэрозолей в Арктике: Демонстрация механизмов обратной связи в климатических процессах на примерах одномерных и двумерных климатических моделей», «Журнал геофизических исследований», вып. 91, сс. 14445-14450, 1986 г. – MacCracken, M.C., R.D. Cess, and G.L. Potter, Climatic effects of anthropogenic Arctic aerosols: an illustration of climatic feedback mechanisms with one- and two-dimensional climate models, *J. Geophys. Res.*, 91, 14445-14450, 1986.

МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата), «Радиационное воздействие изменения климата», см. в «Изменение климата», изд-во Университета Кембридж, Кембридж, Великобритания, 2001 г. – IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001: Radiative forcing of climate change, in *Climate Change 2001*, Cambridge Univ. Press, New York, Cambridge University Press, 2001.

МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата), «Резюме для лиц, определяющих политику», вклад Рабочей группы I в Четвертый доклад об оценках МГЭИК, 2007 г. – IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Summary for Policymakers, Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report.

Менон и Ротстайн (С. Менон и Л. Ротстайн), «Радиационное влияние аэрозольных эффектов на кучевые и слоистые облака жидкой фазы – Выводы по исследованиям реакций с применением двух климатических моделей», журнал «Динамика климата», вып. 27, сс. 345-356, 2006 г. – Menon, S. and L. Rotstayn, The radiative influence of aerosol effects on liquid-phase cumulus and stratiform clouds based on sensitivity studies with two climate models, *Clim. Dyn.*, 27, 345-356, 2006.

Олтманс и др. (С. Дж. Олтманс, И. Э. Галболли, Э. Дж. Брюнке и др.), «Динамика озона в тропосфере», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 25, сс. 139-142, 1998 г. – Oltmans, S.J., I.E. Galbally, E.G. Brunke, et al., Trends of ozone in the troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 139-142, 1998.

Накано и др. (Т. Накано, С. Куниёши, М. Фукуда), «Временные вариации в выбросах метана из болотистых территорий тундры в регионе вечной мерзлоты северо-восточной Сибири», журнал ««Экология атмосферы», вып. 34, сс. 1205-1213, 2000 г. – Nakano, T., S. Kuniyoshi, and M. Fukuda, Temporal variation in methane emission from tundra wetlands in a permafrost area, northeastern Siberia, *Atmos. Env.*, 34, 1205-1213, 2000.

Пети и др. (Ж. Пети, Ж. Жузель, Д. Рено и др.) «История климата и атмосферы в последние 420 тысяч лет – Исследования ледового ядра с антарктической станции «Восток»», журнал «Природа», вып. 399, сс. 429-436, 1999 г. – Petit, J., J. Jouzel, D. Raynaud, et al., Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, 399, 429-436, 1999.

Принн и др., (Р. Дж. Принн, Р. Ф. Уайсс, Б. Р. Миллер и др.), «Атмосферная динамика и продолжительность жизни  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$  и глобальное содержание  $\text{OH}$ », журнал «Наука», вып. 269, сс. 187-189, 1995 г. – Prinn, R.G., R.F. Weiss, Miller, B.R. et al., Atmospheric trends and lifetime of  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$  and global  $\text{OH}$  concentrations, *Science*, 269, 187-189, 1995.

Пьюшелл и Кинне (Р. Ф. Пьюшелл и С. А. Кинне), «Физические и радиационные свойства арктических атмосферных аэрозолей», журнал «Наука общей окружающей среды», вып. 161, сс. 811-824, 1995 г. – Pueschel, R.F. and S.A. Kinne, Physical and radiative properties of Arctic atmospheric aerosols, *Sci. Tot. Env.*, 161, 811-824, 1995.

Раманатан и Кармайкл (В. Раманатан, Г. Кармайкл), «Глобальные и региональные изменения климата как результат воздействия черного углерода», журнал «Природа, геофизические науки», вып. 1, сс. 221-227, 2008 г. – Ramanathan, V. and G. Carmichael, Global and regional climate changes due to black carbon, *Nature Geoscience*, Advanced online publishing, 2008.

Риттер и др. (К. Риттер, Ю. Нотхольт, Ю. Фишер, К. Ратке), «Прямое тепловое радиационное воздействие тропосферных аэрозолей в Арктике – Результаты наземных измерений с помощью инфракрасной спектроскопии», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 32, doi:10.1029/2005GL024331, 2005 г. – Ritter, C., J. Notholt, J. Fisher, and C. Rathke, Direct thermal radiative forcing of tropospheric aerosol in the Arctic measured by ground based infrared spectrometry, *Geophys. Res. Lett.*, 32, doi:10.1029/2005GL024331, 2005.

Серрезе и др. (М. С. Серрезе, М. М. Холланд, Дж. Строув). «Прогнозы сокращения ледовых покровов арктических морей», журнал «Наука», вып. 315, сс. 1533-1536, 2007 г. – Serreze, M.C., M.M. Holland, J. Stroeve, Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover, *Science*, 315, 1533 – 1536, 2007).

Сируа и Барри (А. Сируа и Л. А. Барри), «Состав и динамика тропосферных аэрозолей нижних слоев арктической тропосферы в районе поселения Алерт, Канада, с 1980 по 1995 гг.», «Журнал геофизических исследований», вып. 104, сс. 11599-11618, 1999 г. – Sirois, A. and L.A. Barrie, Arctic lower tropospheric aerosol trends and composition at Alert, Canada: 1980 – 1995, *J. Geophys. Res.*, 104, 11599-11618, 1999.

Смол и др. (Дж. П. Смол, А. П. Вулф, Х. Дж. Б. Беркс, и др.), «Климатические изменения в режимах биологических сообществ арктических озер». Протоколы Национальной академии наук США, вып. 102, сс. 4397-4402, 2005 г. – Smol, J.P., A.P. Wolfe, H.J.B. Birks, et al., Climate-driven regime shifts in the biological communities of Arctic lakes, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 102, 4397-4402, 2005.

Спани и др. (Р. Спани, Ж. Шаппелля, Т. Стокер и др.), «Концентрации атмосферного метана и закиси азота в поздний плейстоценовый период – Исследования антарктических ледовых кернов», журнал «Наука», вып. 310, сс. 1317-1321, 2005 г. – Spahni, R., J. Chappellaz, T.F. Stocker, et al., Atmospheric methane and nitrous oxide of the late Pleistocene from Antarctic ice cores, *Science*, 310, 1317-1321, 2005.

Столь (А. Столь), «Характеристики атмосферного перемещения загрязнителей в тропосферу Арктики», «Журнал геофизических исследований», вып. 111, D11306, doi:10.1029/2005JD006888, 2006 г. – Stohl, A.: Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere. *J. Geophys. Res.* 111, D11306, doi:10.1029/2005JD006888, 2006.

Столь и др. (А. Столь, Э. Эндрюс, Дж. Ф. Беркхарт, К. Форстер, А. Хербер, С. В. Хох, Д. Ковал, К. Лундер, Т. Меффорд, Дж. А. Огрен, С. Шарма, Н. Спихтингер, К. Стэбель, Р. Стоун, Й. Стрем, К. Терсет, К. Верли, К. Э. Йттри), «Увеличение арктических концентраций светопоглощающих аэрозолей вследствие североамериканских лесных пожаров летом 2004 г.», «Журнал геофизических исследований», вып. 111, D22214, doi:10.1029/2006JD007216, 2006 г. – Stohl, A., E. Andrews, J. F. Burkhart, C. Forster, A. Herber, S. W. Hoch, D. Kowal, C. Lunder, T. Mefford, J. A. Ogren, S. Sharma, N. Spichtinger, K. Stebel, R. Stone, J. Ström, K. Tørseth, C. Wehrli, and K. E. Yttri, Pan-Arctic enhancements of light absorbing aerosol concentrations due to North American boreal forest fires during summer 2004, *J. Geophys. Res.* 111, D22214, doi:10.1029/2006JD007216, 2006.

Столь и др. (А. Столь, Т. Берг, Дж. Ф. Беркхарт и др.), «Дым в Арктике – рекордные концентрации загрязнения атмосферы в европейской части Арктики как следствие сжигания пожнивных остатков в Восточной Европе в период весны 2006 г.», журнал «Химия и физика атмосферы», вып. 7, сс. 511-534, 2007 г. – Stohl, A., T. Berg, J.F. Burkhart, et al., Arctic smoke – record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 511-534, 2007.

Строув и др. (Дж. К. Строув, Т. Маркус, В. Н. Мейер, Дж. Миллер). «Недавние изменения в сезоне таяния в Арктике», журнал «Анналы гляциологии», вып. 44, сс. 367-374, 2006 г. – Stroeve, J.C., T. Markus, W.N. Meier, J. Miller, Recent changes in the Arctic melt season, *Ann. Glaciol.*, 44, 367-374, 2006.

Текстор и др. (К. Текстор, М. Шульц, С. Гиберт и др.), «Анализ и количественное исчисление разнообразия аэрозольных жизненных циклов в проекте AeroCom», журнал «Химия и физика атмосферы», вып. 6, сс. 1777-1813, 2006 г. – Textor, C., M. Schulz, and S. Guibert et al., Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1777-1813, 2006.

Текстор и др. (К. Текстор, М. Шульц, С. Гиберт и др.), «Эффект унификации данных по выбросам на

свойства аэрозолей в глобальных моделях – Эксперимент проекта AeroCom», журнал «Химия и физика атмосферы», вып. 7, сс. 4489-4501, 2007 г. – Textor, C., M. Schulz, S. Guibert, et al., The effect of harmonized emissions on aerosol properties in global models – an AeroCom experiment, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4489-4501, 2007.

Туми (С. Туми), «Влияние загрязнений на способность облаков отражать коротковолновое излучение», «Журнал атмосферных наук», вып. 34, сс. 1149-1152, 1977 г. – Twomey, S., The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, 34, 1149-1152, 1977.

Уокер и др. (М. Д. Уокер и др.), «Чувствительность растительных сообществ на экспериментальное потепление в биоме тундры», Протоколы Национальной академии наук США, вып. 103, сс. 1342-1346, 2006 г. – Walker, M. D. et al., Plant community responses to experimental warming across the tundra biome, *PNAS*, 103, 1342-1346, 2006.

Уолтер и др. (К. М. Уолтер, С. А. Зимов, Дж. П. Чантон, Д. Вербила, Ф. С. Чапин III), «Метан, испаряющийся из сибирских талых озер, как следствие положительной ответной реакции на потепление климата», журнал «Наука», вып. 443, сс. 71-75, 2006 г. Walter, K.M., S.A. Zimov, J.P. Chanton, D. Verbyla, and F.S. Chapin III, Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming, *Nature*, 443, 71-75, 2006.

Уоррен и Уискомб (С. Дж. Уоррен и У. Дж. Уискомб), «Грязный снег после ядерной войны», журнал «Природа», вып. 313, сс. 467-470, 1985 г. – Warren, S.G. and W.J. Wiscombe, Dirty snow after nuclear war, *Nature*, 313, 467-470, 1985.

Уэбблс и Хейхоу (Д. Дж. Уэбблс и К. Хейхоу) «Атмосферный метан и глобальные изменения климата», журнал «Обзоры научных исследований в геофизике», вып. 57, сс. 177-210, 2002 г. – Wuebbles, D.J. and K. Hayhoe, Atmospheric methane and global change, *Earth-Science Reviews*, 57, 177-210, 2002.

Флэннер и др. (М. Дж. Флэннер, Ч. С. Зендер, Дж. Т. Рэндерсон, Ф. Дж. Рах), «Текущее климатическое воздействие и реакции содержания черного углерода в снеге», «Журнал геофизических исследований», вып. 112, D11202, doi:10.1029/2006JD008003, 2007 г. – Flanner, M.G., C.S. Zender, J.T. Randerson, and P.J. Rasch, Present-day climate forcing and response from black carbon in snow, *J. Geophys. Res.*, 112, D11202, doi:10.1029/2006JD008003, 2007.

Фридлинд и др. (Э. М. Фридлинд, А. С. Акерман, Дж. Макфаркухар, Г. Чзан, М. Р. Поллот, П. Дж. ДеМотт, А. Дж. Пренни, А. Дж. Хеймсфилд), «Ледовые характеристики однослоевого слоисто-кучевого облака в ходе Эксперимента по смешанным арктическим облакам (M-PACE): Часть II, результаты моделирования», «Журнал геофизических исследований», в печати, 2007 г. – Fridlind, A.M., A.S. Ackerman, G. McFarquhar, G. Zhang, M.R. Poellot, P.J. DeMott, A.J. Prenni, and A.J. Heymsfield, 2007: Ice properties of single-layer stratocumulus during the Mixed-Phase Arctic Cloud Experiment (M-PACE): Part II, Model results. *J. Geophys. Res.*, in press, 2007.

Фьоре и др. (А. М. Фьоре, Д. Дж. Джейкоб, Б. Д. Филд, Д. Дж. Стритс, С. Д. Фернандес, К. Янг), «Подтверждение взаимосвязи между озоновым загрязнением и изменением климата – Аргументация в пользу урегулирования метанового баланса», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 29(19), 1919, doi:10.1029/2002GL015601, 2002 г. – Fiore, A.M., D.J. Jacob, B.D. Field, D.G. Streets, S.D. Fernandes, and C. Jang, Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane, *Geophys. Res. Lett.*, 29(19), 1919, doi:10.1029/2002GL015601, 2002.

Хааген-Смит (А. Дж. Хааген-Смит), «Химия и физиология лос-анджелесского смога», журнал «Исследования промышленной и инженерной химии», вып. 44, сс. 1342-1346, 1952 г. – Haagen-Smit, A.J., Chemistry and physiology of Los Angeles smog, *Ind. Eng. Chem.*, 44, 1342-1346, 1952.

Хаглер и др. (Г. С. У. Хаглер, М. Х. Бергин, Ю. А. Смит, Дж. Э. Дибб, К. Андерсон, Э. Дж. Стиг), «Твердые и водорастворимые частицы углерода – Последние исследования снега в районе Саммита, Гренландия», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 34, L16505, doi:10.1029/2007GL030110, 2007 г. – Hagler, G. S. W., Bergin, M. H., Smith, E. A., Dibb, J. E., Anderson, C., and Steig, E. J: Particulate and water-soluble carbon measured in recent snow at Summit, Greenland, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L16505, doi:10.1029/2007GL030110, 2007.

Халил и др. (М. А. Х. Халил, К. Л. Бутенхофф, Р. А. Расмуссен), «Атмосферный метан: Паттерны и циклы источников и поглотителей», журнал «Экологические науки и технологии», вып. 41, сс. 2131-2137, 2007 г. – Khalil, M.A.K., C.L. Butenhoff, and R.A. Rasmussen, Atmospheric methane: Trends and cycles of sources and sinks, *Environ. Sci. Tech.*, 41, 2131-2137, 2007.

Хамейдес и др., (У. Л. Хамейдес, Ф. Фезенфельд, М. О. Роджерс и др.), «Взаимодействие предшественников озона в окружающей атмосфере», «Журнал геофизических исследований», вып. 97, сс. 6037-6055, 1992 г. – Chameides, W.L., F. Fehsenfeld, M.O. Rodgers, et al., Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 97, 6037-6055, 1992.

Хансен и Назаренко (Дж. Хансен и Л. Назаренко), «Сажа и ее воздействие на климат через альbedo снега и льда», Протоколы Национальной академии наук США, вып. 101, сс. 423-428, 2004 г. – Hansen, J. and L. Nazarenko, Soot climate forcing via snow and ice albedos, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 101, 423-428, 2004.

Хансен и др. (Дж. Хансен, М. Сато, Р. Руди и др.), «Эффективность различных типов климатического воздействия», «Журнал геофизических исследований», вып. 110, D18104, doi:10.1029/2005JD005776, 2005 г. – Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, et al., Efficacy of climate forcings, *J. Geophys. Res.*, 110, D18104, doi:10.1029/2005JD005776, 2005.

Хансен и др. (Дж. Хансен, М. Сато, Р. Руди и др.), «Моделирование климата на период с 1880 по 2003 гг. с использованием модели ModelE Института космических исследований Годдарда», журнал «Динамика климата», doi:10.1007/s00382-007-0255-8, 2007 г. – Hansen, J., Sato, M., Ruedy R., et al., Climate simulations for 1880 – 2003 with GISS modelE, *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-007-0255-8, 2007.

Харпер и др. (Л. А. Харпер, О. Т. Денмид, Дж. Р. Фрейни, Ф. М. Байерс), «Непосредственные измерения метановых выбросов с пастбищ и кормовых площадок скота», «Журнал зоотехнии», вып. 77, сс. 1392-1401, 1999 г., Harper, L.A., O.T. Denmead, J.R. Freney, and F.M. Byers, Direct measurements of methane emissions from grazing and feedlot cattle, *J. Anim. Sci.*, 77, 1392-1401, 1999.

Холл и Цюй (А. Холл и С. Цюй). «Использование текущего сезонного цикла для ограничения положительной обратной связи снега и альбедо при будущих изменениях климата», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 33, L03502, doi:10.1029/2005GL025127, 2006 г. – Hall, A. and X. Qu, Using the current seasonal cycle to constrain snow albedo feedback in future climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03502, doi:10.1029/2005GL025127, 2006.

Хуанг и др. (Й. Хуанг, Р. Л. Сасс, Ф. М. Фишер), «Полуэмпирическая модель метановых выбросов из затопленных почв рисовых полей», журнал «Биология глобального изменения климата», вып. 4, сс. 247-268, 1998 г. – Huang Y., R.L. Sass, and F.M. Fisher, A semi-empirical model of methane emission from flooded rice paddy soils, *Glob. Change Biol.*, 4, 247-268, 1998.

Хувелинг и др. (С. Хувелинг, Т. Камински, Ф. Дентенер, Дж. Леливелд, М. Хайманн), «Обратное моделирование метановых источников и поглотителей с использованием сопряженной версии глобальной модели переноса», «Журнал геофизических исследований», вып. 104, сс. 26137-26160, 1999 г. – Houweling, S., T. Kaminski, F. Dentener, J. Lelieveld, and M. Heimann, Inverse modeling of methane sources and sinks using the adjoint of a global transport model, *J. Geophys. Res.*, 104, 26137-26160, 1999.

Чапин и др. (Ф. С. Чапин, М. Стурм, М. С. Серрезе и др.) «Роль изменений в земной поверхности в летнем потеплении в Арктике», журнал «Наука», вып. 310, сс. 657-660, 2005 г. – Chapin, F.S., M. Sturm, M.C. Serreze, et al., Role of land-surface changes in Arctic summer warming, *Science*, 310, 657 – 660, 2005.

Шарма и др. (С. Шарма, Д. Лаву, Э. Кашье, Л. А. Барри, С. Л. Гонг), «Долгосрочная динамика концентраций черного углерода в канадских регионах Арктики», «Журнал геофизических исследований», вып. 109, D15203, doi:10.1029/2003JD004331, 2004 г. – Sharma, S., D. Lavoue, H. Cachier, L.A. Barrie, and S.L. Gong, Long term trends of the black carbon concentrations in the Canadian Arctic, *J. Geophys. Res.*, 109, D15203, doi:10.1029/2003JD004331, 2004.

Шарма и др. (С. Шарма, Э. Эндрюс, Л. А. Барри, Дж. А. Огрен, Д. Лаву), «Источники и вариации в концентрациях эквивалентного черного углерода в верхних широтах Арктики – Результаты продолжительных наблюдений в районах Алерта и Барроу в период с 1983 по 2003 гг.», «Журнал геофизических исследований», вып. 11, D14208, doi:10.1029/2005JF006581, 2006 г. – Sharma, S., E. Andrews, L.A. Barrie, J.A. Ogren, and D. Lavoue, Variations and sources of the equivalent black carbon in the High Arctic revealed by long term observations at Alert and Barrow: 1989-2003, *J. Geophys. Res.*, 11, D14208, doi:10.1029/2005JF006581, 2006.

Шинделл и др. (Д. Т. Шинделл, Дж. Фалуведжи, Н. Белл), «Воздействие тропосферного озона с доиндустриальных времен до сегодняшнего дня – Данные по исследованиям с усовершенствованным моделированием по Глобальной химико-климатической модели Института космических исследований Годдарда», журнал «Химия и физика атмосферы», вып. 3, сс. 1675-1702, 2003 г. – Shindell, D. T., G. Faluvegi, and N. Bell, Preindustrial-to-present-day radiative forcing by tropospheric ozone from improved simulations with the GISS chemistry-climate GCM, *Atm. Chem. Phys.*, 3, 1675-1702, 2003.

Шинделл и др. (Д. Шинделл, Дж. Фалуведжи, А. Лацис, Дж. Хансен, Р. Руди, Е. Агиляр), «Повышенная роль тропосферного озона в климатических изменениях 20-го века», «Журнал геофизических исследований», вып. 111, D08302, doi:10.1029/2005JD006348, 2006 г. – Shindell, D., G. Faluvegi, A. Lacis, J. Hansen, R. Ruedy, and E. Aguilar, Role of tropospheric ozone increases in 20th-century climate change, *J. Geophys. Res.*, 111, D08302, doi:10.1029/2005JD006348, 2006.

Шинделл (Д. Шинделл), «Потепление в Арктике - локальное и удаленное воздействие», «Журнал корреспонденции геофизических исследований», вып. 34, L14704, doi:10.1029/2007GL030221, 2007 г. – Shindell, D., Local and remote contributions to Arctic warming, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L14704, doi:10.1029/2007GL030221, 2007.

Шинделл и др. (Д. Шинделл и др.), «Анализ перемещения загрязнителей в Арктику – Исследование с применением нескольких моделей», журнал «Химия и физика атмосферы», Архив работ, представленных для открытой дискуссии, вып. 8, сс. 8385-8429, 2008 г. – Shindell, D., et al., A multi-model assessment of pollution transport to the Arctic, *Atm. Chem. Phys. Disc.*, 8, 8385-8429, 2008.

Шоу (Г. Э. Шоу), «Турбулентная диффузия арктических загрязнений, переносимых из средних широт – Предварительная модель», журнал «Экология атмосферы», вып. 15, сс. 1483-1490, 1981 г. – Shaw, G.E., Eddy diffusion transport of Arctic pollution from the midlatitudes: a preliminary model, *Atmos. Environ.*, 15, 1483-1490, 1981.

Шоу (Г. Э. Шоу), «Феномен арктического смога», журнал «Бюллетень Американского метеорологического общества», вып. 76, сс. 2403-2413, 1995 г. – Shaw, G.E., The Arctic haze phenomenon, *Bull. Am. Met. Soc.*, 76, 2403-2413, 1995.

Шоу и Стамнес (Г. Э. Шоу и К. Стамнес), «Арктический смог: Нарушение полярного радиационного баланса», журнал «Анналы Нью-Йоркской Академии Наук», вып. 338, сс. 533-539, 1980 г. – Shaw, G.E. and K. Stamnes, Arctic haze: perturbation of the polar radiation budget, Ann. N.Y. Acad. Sci., 338, 533-539, 1980.

Шульц и др. (М. Шульц, К. Текстор, С. Кинне и др.), «Радиационное воздействие аэрозолей – Результаты работы моделей AeroCom на основе показателей доиндустриальной эпохи и сегодняшнего дня», журнал «Химия и физика атмосферы», вып. 6, сс. 5255-5264, 2006 г. – Schulz, M., C. Textor, and S. Kinne et al., Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations, Atmos. Chem. Phys., 6, 5255-5264, 2006.

Якобсон (М. З. Якобсон), «Сажа в выбросах от ископаемого топлива и биотоплива, климатическая реакция и эффект взаимосвязи сажи и излучательной и отражающей способности снега и морского льда», «Журнал геофизических исследований», вып. 109, D21201, doi:10.1029/2004JD004945, 2004 г. – Jacobson, M.Z., Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity, J. Geophys. Res., 109, D21201, doi:10.1029/2004JD004945, 2004.