

САЖЕВЫЙ АЭРОЗОЛЬ В АРКТИКЕ

Климатически активные составляющие атмосферы. Радиационное воздействие

Наблюдающееся в настоящее время повышение глобальной температуры связано и с изменением содержания в толще атмосферы за счет антропогенных выбросов так называемых радиационно или климатически активных ее составляющих: парниковых газов, к которым в первую очередь относятся углекислый газ CO_2 , метан CH_4 , озон O_3 , закись азота N_2O , различные гидрофторуглероды, заменившие озоноразрушающие фреоны, а также аэрозоли различного физико-химического состава. Для количественной оценки вклада той или иной составляющей атмосферы в формирование температурного режима используется характеристика, называемая радиационным воздействием (форсингом). Количественно радиационное воздействие равно совокупному изменению потоков коротковолновой и длинноволновой радиации за рассматриваемый период времени на некотором уровне в атмосфере — обычно на уровне тропопаузы — при изменении содержания конкретной составляющей. С течением времени оценки вклада вышеназванных составляющих в потепление менялись. Это было связано как с изменением их концентраций (как правило, с возрастанием), так и с уточнением величин их вклада в изменение глобальной температуры. Средние величины суммарного радиационного воздействия за счет антропогенных выбросов и изменений характеристик поверхности Земли при хозяйственной деятельности с 1950 г. к 2011 г. возросли в 4 раза — с 0,57 до 2,29 $\text{Вт}/\text{м}^2$.

В докладе IPCC-2007 приведены оценки вклада различных составляющих атмосферы в ее радиационный прогрев. Эти величины представлены на рис. 1.

Как видно из рисунка, наибольший вклад в глобальное потепление вносит углекислый газ. Усилия мирового сообщества по ограничению влияния выбросов парниковых газов, выразившиеся в принятии Киотского протокола и последующих шагах по его реализации, оказались малоэффективными в силу нескольких причин. Даже при полном прекращении дополнительных

выбросов углекислого газа эффект понижения температуры проявится далеко не сразу. Дело в том, что углекислый газ химически пассивен, его «время жизни» в атмосфере составляет около 100 лет. Поэтому ограничение или прекращение дополнительных выбросов его в атмосферу скажется лишь через несколько десятилетий. В качестве альтернативы сокращению выбросов углекислого газа предлагается уменьшить выбросы других радиационно активных составляющих атмосферы (газов и аэрозолей), суммарное воздействие которых на радиационный режим и на климат сравнимо с таковым за счет CO_2 , но их время пребывания в атмосфере существенно короче (недели, месяцы или годы). В этом случае можно ожидать, что отклик климатической системы (снижение скорости разогрева) на уменьшение содержания этих «короткоживущих» составляющих проявится быстрее, чем при сокращении выбросов углекислого газа.

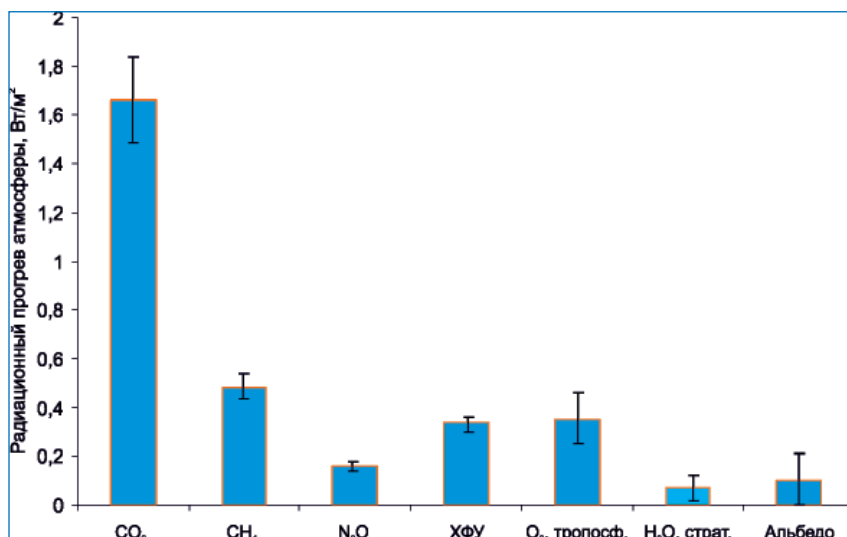
К климатообразующим атмосферным компонентам относится и атмосферный аэрозоль. Многочисленные его виды, имеющие и естественное (природное), и антропогенное происхождение, различным образом и в разной степени влияют на формирование климата. Но их основное отличие, как климатообразующих атмосферных составляющих, от «главного» парникового газа — CO_2 — заключается в том, что аэрозоли относятся к разряду так называемых короткоживущих составляющих атмосферы.

Сажевый аэрозоль также входит в список факторов, оказывающих и прямое, и косвенное воздействие на климат. Сажевые частицы («black carbon», BC в англоязычной литературе) возникают при неполном окислении углерода при горении топлива или биомассы. Эти частицы могут оставаться в атмосфере в течение нескольких дней, прежде чем они будут вымыты жидкими или твердыми осадками.

Прямое воздействие состоит в поглощении коротковолновой солнечной радиации сажевыми частицами, находящимися в воздухе. При наличии сажевого аэрозоля в воздухе происходит дополнительное нагревание слоя воздуха с повышенной концентрацией сажевых частиц и, в последующем, дополнительное тепловое излучение этого слоя.

Косвенное воздействие сажевого аэрозоля, как и других климатообразующих факторов, на климатические характеристики реализуется самыми разнообразными способами через системы положительных и отрицательных обратных связей в инициируемых и формируемых ими процессах в системе Земля — атмосфера. Например, при поступлении частиц сажи в атмосферу они становятся дополнительными ядрами конденсации и приводят к образованию облачности. Увеличение облачного покрова приводит к возрастанию альбедо системы Земля — атмосфера и увеличению отраженной радиации, т.е. радиационное воздействие аэрозоля в этом случае отрицательно. Но присутствие сажи в составе

Рис. 1. Величины вкладов парниковых газов и сажи (из-за изменения альbedo поверхности) в радиационный прогрев атмосферы, $\text{Вт}/\text{м}^2$. Вертикальными штрихами отмечены оценки верхнего и нижнего пределов воздействия указанных составляющих атмосферы.



облачных капель или кристаллов увеличивает поглощательные свойства облачности как в видимом, так и в инфракрасном (тепловом) диапазоне длин волн и, тем самым, увеличивает количество нисходящей тепловой радиации.

В холодный период года при выпадении снега отдельные снежинки, в состав которых могут входить и сажевые частицы, сталкиваясь друг с другом, образуют хлопья, которые эффективно захватывают, переносят и осаждают аэрозольные частицы на поверхность. Воздух при этом очищается, но загрязняется снежный покров и уменьшается его альbedo. Уменьшение альbedo, в свою очередь, вызывает увеличение поглощения приходящей к поверхности солнечной радиации и дополнительный нагрев поверхности и, как следствие, повышение температуры нижней атмосферы. Наиболее сильно это может проявиться в Арктике. Количественные оценки влияния сажевого аэрозоля на величину альbedo (коэффициента отражения) снежного покрова показали, что для уменьшения величины альbedo тающего снега на 1 % достаточно концентрации частиц сажи ~10 ppb (10 нанограмм сажи на 1 грамм снега).

Для большей части арктического региона характерен своеобразный режим поступления солнечной радиации с чередованием полярного дня и полярной ночи. С ноября по февраль в период полярной ночи в пределах Арктики суммарная радиация практически отсутствует, радиационный баланс обусловлен только эффективным излучением. Наличие или отсутствие сажевого аэрозоля и в воздухе, и на снежно-ледовой поверхности в темное время не сказывается на величине радиационного баланса: месячные значения радиационного баланса в этот период года отрицательны. При появлении солнца радиационный баланс становится положительным, а его величина существенным образом зависит от величины альbedo поверхности. Оседающие на поверхность снежного покрова частицы сажевого аэрозоля затемняют поверхность, т.е. приводят к уменьшению альbedo поверхности, что, в свою очередь, увеличивает количество поглощенной поверхностью солнечной радиации и ускоряет процессы таяния.

Согласно модельным расчетам, таяние загрязненного льда при типичных для арктического региона метеорологических условиях начинается почти на неделю, а сильно загрязненного — почти на три недели раньше, чем начинает таять чистый лед. По данным К.Я. Кондратьева, угольная пыль, выпадающая на снег в регионах расположения угольных бассейнов, может ускорить таяние снега на 20–25 дней. Этот существенный сдвиг сроков начала таяния и ускорение процессов таяния из-за загрязнения снежного покрова могут наложиться на общую тенденцию сокращения числа дней с устойчивым снежным покровом из-за более позднего установления и более раннего его схода, наблюдаемую в арктической зоне за последние 30 лет. Важно отметить, что таяние верхнего слоя снега (незагрязненного!) весной в Арктическом бассейне начинается при температуре 4 °C ниже нуля, если потоки солнечной радиации достигают величины 600 Вт/м². При наличии загрязнений в толще снежного покрова, осаждавшихся на поверхность в течение темных зимних месяцев, таяние снега и образование снежинок при появлении

солнца начинается раньше обычных сроков и происходит более интенсивно. Поскольку толщины снега на льдах Арктического бассейна и окраинных морей невелики — в мае (месяц максимального снегонакопления) средняя многолетняя толщина снежного покрова достигает 35 см, — то проникающей солнечной радиации оказывается достаточно, чтобы таяние начиналось и развивалось внутри снеговой толщи, где сосредоточены пятна загрязнений, а не только на поверхности. Все эти процессы приводят, в частности, и к существенно более быстрым изменениям альbedo поверхности в более ранние, по сравнению с обычными, сроки. Тем самым обратные альбедные связи в климатической системе Арктики существенно интенсифицируются.

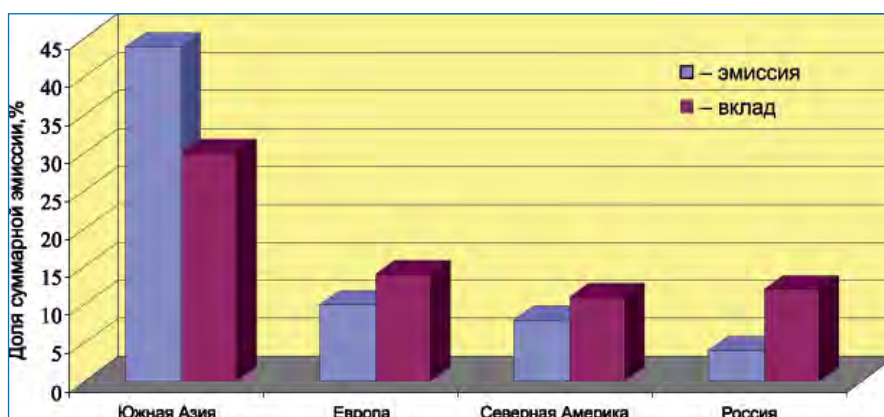
Источники черного углерода и поступление его в Арктику

Крупнейшими источниками эмиссии сажевого аэрозоля, достигающего Арктики, являются палы (сжигание пожнивных сельскохозяйственных остатков и травы), лесные пожары и выбросы дизельного автотранспорта. За ними следуют пожары, дизельные установки и промышленные производства, а также сжигание попутного газа. Собственно сажевые частицы субмикронного размера существуют в чистом виде недолго. После образования они достаточно быстро оказываются смешанными с другими аэрозольными компонентами — такими, как сульфаты и аэрозоли органического происхождения, — или образуют сажевые агрегаты. Образуются сажесодержащие аэрозольные частицы, обладающие в целом теми же самыми радиационными характеристиками, что и собственно сажевые частицы. Время жизни (пребывания) в атмосфере частиц сажесодержащего (сажевого) аэрозоля составляет от нескольких дней до нескольких недель, в зависимости от метеорологических условий, и они могут переноситься на значительные расстояния от источников.

Наличие сажевого аэрозоля в арктических широтах севернее 70° с.ш. является преимущественно результатом дальнего переноса с загрязненными им воздушными массами с территорий бывшего СССР, Европы, Северной Америки и Южной Азии. На рис. 2 приведены относительные величины суммарных выбросов загрязнений из промышленных источников и их вкладов в загрязнение Арктики.

Несмотря на то, что доля южноазиатских источников в суммарной эмиссии других регионов два раза выше (44 %), чем общий вклад других представленных на рисунке регионов (22 %), ее относительный вклад в загрязнение арктической атмосферы промышленными выбро-

Рис. 2. Распределение промышленных выбросов по регионам и их вклады в загрязнение Арктики.



сами, из-за географической удаленности, меньше (30 %), чем совместный вклад Европы (14 %), Северной Америки (11 %) и России (12 %).

Степень «легкости» переноса воздушных масс, вместе с находящимися в них примесями, из умеренных широт в высокие в целом регулируется расположением так называемого полярного фронта. В зимний период его граница на территориях Евразии и Северной Америки опускается до широт 40–45° с.ш. В границах территорий, охватываемых полярным фронтом, облегчен дальний перенос загрязняющих примесей вместе с воздушными массами от их источников в умеренных широтах. Таким образом, можно говорить, что эмиссии из источников, расположенных севернее 40° с.ш., существенно влияют на уровень загрязнения арктической атмосферы. На зону севернее 40° с.ш. приходится 24 % глобальных эмиссий сажевого аэрозоля, в то время как севернее 50° с.ш. эта доля снижается до 9 %, а севернее 60° с.ш. — составляет менее 1 %.

При этом следует отметить, что уровни загрязнения в той или иной частях арктического региона (в частности, концентрации сажевого аэрозоля) определяются траекториями переноса воздушных масс и расстояниями между источником и пунктом наблюдений. Именно в зимние месяцы в Арктике и формируется так называемая «арктическая дымка» — слой воздуха с повышенной концентрацией частиц преимущественно сульфатного и сажевого аэрозоля. В течение зимы, когда осуществляется основной перенос примесей в высокие широты, происходит накопление загрязнений в толще снега. Летом, когда граница полярного фронта располагается выше 65° с.ш., переносы из умеренных широт блокированы и на уровни загрязнения арктической атмосферы могут существенно влиять только выбросы из «местных» источников. С территорий, расположенных севернее 70° с.ш., эмиссии сажи пренебрежимо малы по сравнению с глобальными и связаны преимущественно с арктическим судоходством. Другой потенциальный источник сажи в этих широтах — сжигание попутных газов на нефтяных и газовых месторождениях и нефтеперерабатывающих предприятиях.

Сажа в снежном покрове арктического региона

Первые результаты натурных исследования уровней загрязнения снежного покрова и воздуха сажевым аэрозолем были получены в 1983–1984 гг. учеными Университета Вашингтона (Сиэтл, США) на суше и льдах Северного Ледовитого океана в зарубежной Арктике. Было установлено, что концентрация сажи в снежном покрове составляла от 5 до 50 ppb, что могло привести к уменьшению альбедо на 4 %. Первые данные об уровнях загрязнения снежного покрова сажевым аэрозолем в российской части Арктики были получены в период проведения МПГ 2007/08 в двух совместных российско-американских экспедициях в весенние периоды 2007 и 2008 гг. (рис. 3).

Измеренные величины концентраций сажевого аэрозоля в различных частях Российской Арктики в снеге низки и не превосходят средних значений, измеренных 25 лет назад за пределами Российской Арктики: от 12 до 30 нг/г во всех пунктах измерений за исключением Хатанги и Воркуты. В окрестностях Хатанги средняя концентрация сажи составила 38 нг/г, около Воркуты — 300 нг/г. По-видимому, даже на расстояниях более 30 км от Воркуты, где отбирались пробы, влияние угольных шахт сказывается на степени загрязнения окружающей среды. Измеренные в пробах снега на льду моря

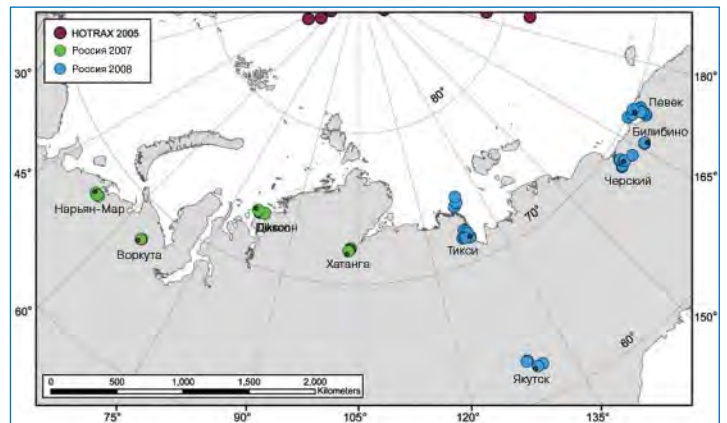


Рис. 3. Схема экспедиционных работ по проекту МПГ 2007/08 «Сажа в арктическом снеге и льде и ее влияние на альбедо поверхности».

Лаптевых концентрации частиц сажи оказались столь же низкими (13 ppb), как и измеренные на о. Диксон и в окрестностях Нарьян-Мара. Для сравнения, на антарктических станциях Амундсен-Скотт и Восток величины концентраций сажевого углерода в снежном покрове, измеренные американскими учеными в 1990-е гг., составляли 0,1—0,7 ppb.

Сажевый аэрозоль

в приповерхностном слое воздуха в Арктике

Измерения массовых концентраций сажевых частиц в воздухе, к сожалению, до сих пор не носят систематического характера, проводились и проводятся «попутно» с другими видами наблюдений за атмосферными составляющими в разные периоды года в различных пунктах и районах Арктики. Имеющиеся на сегодня данные всех измерений массовых концентраций сажевого аэрозоля в Арктике представлены в таблице.

Район, период	$M_{bc} \pm \text{СКО}$	Минимум	Максимум
о. Врангеля, апрель 1989 г.	0,049±0,025	0,030	0,105
о. Врангеля, май 1989 г.	0,025±0,010	0,013	0,045
Северная Земля, март–май 1990 г.		0,014	0,514
Баренцево море вблизи ЗФИ, сент. 1998 г.	0,07		
Тикси, февраль 1995 г.	0,31		
Тикси, май 1995 г.	0,081		
Тикси, июль 1995 г.	0,064		
Тикси, июнь 2010 г.	0,026±0,036	0,001	4,43
Белое море, август 2003–2007 гг.	0,31±0,23	0,003	4,68
Карское море, 2007 г.	0,09±0,21	0,001	1,92
Баренцбург, апрель–май 2011 г.	0,149±0,085	0,008	0,551
Баренцбург, июль–август 2011 г.	0,432±0,42	0,133	3,73
Баренцбург, 2012 г.	0,12±0,19		
Баренцбург, 2013 г.	0,17±0,36		
Вблизи Антарктиды, 2007 г.	0,065±0,11	0,002	0,895

Примечание: 1 мкг/м³ примерно соответствует 1 ppb.

Как видно из приведенных выше величин, в арктическом регионе наблюдается значительная пространственная и временная (внутри- и межгодовая) изменчивость концентраций сажевого аэрозоля в приземном слое воздуха. Характеристики как пространственной, так и временной изменчивости содержаний/концентраций сажевых частиц формируются под действием целого комплекса факторов: мощность и пространственное распределение источников сажевого аэрозоля, дальний перенос воздушных масс, стратификация атмосфе-

ры, облачность, атмосферные осадки и многие другие. На сегодняшний день исследования характеристик сажевого аэрозоля в российской части Арктики находятся на начальном этапе. Они начали приобретать систематический характер после организации постоянных измерений концентрации сажи в obs. Тикси и сезонных измерений в РНЦШ (Баренцбург).

В.Ф.Радионов (ААНИИ)

ИЗ ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ АНТАРКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА РАДОК

Широко известно антарктическое о. Восток, скрытое под толщей ледника мощностью более 3,5 км. Но мало кто слышал о самом глубоком из уже открытых наземных водных бассейнов ледяного континента — оз. Радок, которое расположено в горах Принс-Чарльз (Восточная Антарктида) на удалении около 290 км от залива Прюдс (море Содружества) и в 40 км юго-западной отечественной полевой базы Союз.

Контуры оз. Радок впервые появились на карте, составленной по результатам аэрофотосъемки Австралийской антарктической экспедиции 1956 г. Австралийцами озеро названо в честь своего соотечественника — Уве Радока, преподавателя метеорологии в университете Мельбурна. Более детально район оз. Радок представлен на топографической карте масштаба 1:100000, изданной Главным управлением геодезии и картографии СССР (ГУГК) в 1978 г. на основе материалов аэрофотосъемки 1972 г. Именно такая карта использовалась участниками 29-й САЭ при проведении сезонных полевых работ в горах Принс-Чарльз с территории полевой базы Союз. Определенная по этой карте площадь поверхности оз. Радок составляла 20,1 км², длина озера — 10 км, наибольшая ширина — 2,9 км. Водная чаша Радока занимает глубокую впадину с крутыми склонами из гранита почти пятисотметровой высоты на западном побережье и из песчаника (высотой до 180 м) — на восточном. Лишь юго-западную часть озера частично по-

крывает ледник. Высота уреза воды озера, отмеченная на карте ГУГК, составляет 7 м над уровнем моря. Как-либо данные батиметрических и гидрологических измерений на о. Радок к моменту начала работ 29-й САЭ отсутствовали.

Выезд группы советских полярников с базы Союз в полевой лагерь на оз. Радок состоялся 9 февраля 1984 г. В лагере (палатка КАПШ-2), который расположился на берегу озера у истока р. Межозерной, для выполнения полевых работ в течение запланированных трех суток осталось пять исследователей. Это были сотрудник Института географии РАН СССР В.И. Бардин (он же начальник полевой базы), два геолога — В.М. Будько и А.А. Кирсанов (ПГО «Аэрогеология»), механик Б.В. Ткачев и гидролог А.А. Пискун (ААНИИ). Транспортировку полярников в лагерь и обратно на базу Союз выполнил водитель вездехода И.Н.Ефимов (ПГО «Севморгеология»).

Намеченные гидрологические исследования на озере, с учетом кратковременности существования лагеря, можно отнести к рекогносцировочным. В то же время они включали целый комплекс работ: промеры озерной чаши, измерение толщин льда, определение вертикального профиля температуры воды, отбор проб воды на различных горизонтах для определения ее химического состава и отбор проб донных отложений для последующего гранулометрического и минералогического анализа.

Гидрологические работы выполнялись тремя членами экспедиции — А.А. Пискуном, Б.В. Ткачевым и В.И. Бардиным. Надо отметить, что ранее (в 1972 г.) В.И. Бардин во время очередной САЭ уже проводил геоморфологические исследования в окрестностях оз. Радок. Тогда у него сложилось убеждение, что озеро должно иметь значительную глубину за счет пересечения на его акватории осей трех хорошо выраженных межгорных котловин, а именно оси основной озерной чаши, оси долины ледника Бэтти (или, по карте ГУГК, — ледника Приозерный) и оси восточного залива озера, к которому примыкает долина Пагодрома, соединяющая оз. Радок с эпишельфовым водоемом Бивер. Желанием проверить свое предположение и был вызван особый интерес В.И. Бардина к



Схема района работ и местоположение полевой базы 29-й САЭ на озере Радок: 1 — коренные породы, 2 — ледники и снежники, 3 — озера, 4 — полевая база Союз, 5 — полевой лагерь на озере Радок.