

П.Н. Священников, Б.В. Иванов, И.А. Говорина

**ВЛИЯНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ОКРЕСТНОСТИ ПОС. БАРЕНЦБУРГ
(АРХ. ШПИЦБЕРГЕН) НА РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
СНЕЖНО-ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА И АТМОСФЕРЫ**

P.N. Sviashchennikov, B.V. Ivanov, I.A. Govorina

**IMPACT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION NEAR
THE SETTLEMENT OF BARENTSBURG
(SPITSBERGEN ARCHIPELAGO) ON THE RADIATION
PROPERTIES OF SNOW-AND-ICE COVER AND ATMOSPHERE**

Представлены результаты полевых исследований, демонстрирующие влияние антропогенного загрязнения снежно-ледяного покрова и приземного слоя воздуха. Описываются методики экспериментов, обсуждаются предварительные результаты, показывающие взаимосвязь «альbedo-загрязнение» и уровень аэрозольного ослабления в приземном слое воздуха.

Ключевые слова: Шпицберген, снежный покров, атмосфера, антропогенное загрязнение.

Results of field studies are presented which demonstrate the impact of anthropogenic pollution of snow-and-ice cover and near the ground layer of air. Experiment methodologies are described, preliminary results are discussed which demonstrate the interrelation of "albedo-pollution" and the level of aerosol attenuation in the near the ground layer of air.

Key words: Spitsbergen, snow cover, atmosphere, anthropogenic pollution.

Климатическая система в полярных областях является наиболее чувствительной к внешним воздействиям, в том числе и антропогенным. В настоящее время российскими и зарубежными специалистами-климатологами активно обсуждается проблема современного глобального потепления и возможных причин этого явления. Основной причиной современного потепления, по мнению большинства ученых, является постоянно увеличивающаяся, вследствие сжигания углеводородного топлива, концентрация углекислого газа в атмосфере. Повышенные содержания антропогенных аэрозолей в окрестности крупных промышленных объектов приводит к прямому воздействию на радиационный баланс подстилающей поверхности [1]. Антропогенное воздействие на климатическую систему, связанное с добычей и сжиганием каменного угля, оказывает существенное влияние на величины потоков коротковолновой и длинноволновой радиации и, тем самым, приводит к значительным климатическим изменениям, проявляющимся как в непосредственной близости от источника выбросов, так и на значительных расстояниях. Арктические регионы наиболее чувствительны к этим процессам. Одним из примеров подобного воздействия может служить Российский шахтерский поселок Баренцбург, расположенный на архипелаге Шпицберген (остров Западный Шпицберген). Угледобывающая деятельность была организована здесь в 1931 г. и с перерывом, связанным со Вто-

рой мировой войной, продолжается там и в настоящее время. В результате хозяйственной деятельности в атмосферу поступает большое количество аэрозолей в виде сажи, при работе тепловой электростанции (ТЭЦ), и частиц угля, выдуваемых с угольного склада (открытый тип хранения) и отвалов породы, расположенных в непосредственной близости от поселка. Впоследствии эти аэрозоли оседают на поверхность снега, в результате чего вглубь снежного покрова попадает значительное количество углеродных частиц. Происходит уменьшение прозрачности атмосферы, уменьшение альbedo подстилающей поверхности, изменение потока проникающей вглубь снега солнечной радиации. Таким образом, радиационный баланс подстилающей поверхности существенным образом изменяется из-за антропогенного воздействия.

Для оценки антропогенного влияния углеродного загрязнения сотрудниками Арктического и антарктического научно-исследовательского института и Санкт-Петербургского государственного университета (кафедры климатологии и мониторинга окружающей среды) с 2007 по 2012 г. проводились специальные натурные исследования непосредственно в поселке Баренцбург и его окрестностях.

Аэрозольное ослабление приходящей коротковолновой радиации исследовалось путем организации одновременных (синхронных) измерений потоков прямой солнечной радиации. Один пункт наблюдений располагался в самом поселке Баренцбург, в непосредственной близости от ТЭЦ. Второй был организован в месте, не подверженном влиянию выбросов аэрозолей (мыс Финесет, 1,5 км к югу от поселка). Синхронные измерения проводились с помощью стандартных сетевых актинометров АТ-50 Янишевского-Савинова в спектральном диапазоне 0,3–3,0 мкм (дискретность измерений 60 секунд). Регистрация сигналов осуществлялась с помощью однотипных портативных мультиметров Escort EDM-1341 (Германия), с разрешением в 0,01 мВ. Наблюдения производились в соответствии с методическими указаниями по проведению актинометрических наблюдений [3].

Актинометрические наблюдения, выполненные в апреле 2011 г. в поселке Баренцбург и его окрестностях позволили провести расчёты аэрозольного ослабления солнечной радиации в атмосфере. Синхронное измерение потока прямой солнечной радиации с помощью актинометров АТ-50 проводились таким образом, чтобы один из актинометров принимал сигнал через «чистую» атмосферу (район мыса Финесет), а второй находился на метеорологической площадке ГМО «Баренцбург» под аэрозольным облаком (территория поселка вблизи ТЭЦ). Первичные измерения осреднялись за 10-минутные интервалы и по осредненным значениям вычислялись коэффициенты прозрачности. Интегральные коэффициенты прозрачности атмосферы были рассчитаны по формуле Бугера-Ламберта:

$$p = \sqrt[m]{S/S_0}, \quad (1)$$

где p – коэффициент прозрачности; S_0 – значение солнечной постоянной, равное 1361 Вт/м^2 ; S – величина потока прямой радиации, измеренная актинометром, m – масса атмосферы.

При расчетах учитывались колебания значений солнечной постоянной в течение года, масса атмосферы и высота солнца во время измерений [2]. Для условий эксперимента масса атмосферы была близка к значению $m = 2$. Результаты расчетов представлены на рис. 1.



Рис. 1. Значения осредненных за 10 мин интегральных коэффициентов прозрачности атмосферы

Изменение во времени величин коэффициентов прозрачности соответствует различным условиям эксперимента. В начале измерения проводились при одинаковых условиях прозрачности, во второй части наблюдений аэрозольное облако (выбросы ТЭЦ) ослабляло солнечную радиацию, измеряемую в поселке, в то время как наблюдения на мысе Финнесет соответствовали прежним условиям «чистой» атмосферы. Осредненные по времени интегральные коэффициенты прозрачности составили 0,740–0,750 при аэрозольном загрязнении и 0,765–0,760 без него. Общее ослабление аэрозолями составило $21,5 \text{ Вт/м}^2$. По сравнению с аналогичными измерениями, выполненными в это же время в 2010 г., аэрозольное ослабление уменьшилось приблизительно в 4 раза. Зафиксированное уменьшение аэрозольного ослабления, очевидно, связано с установкой на ТЭЦ летом 2010 г. новых фильтров и систем дожига топлива.

Аналогичные результаты были получены и при анализе уровня загрязнения проб морского льда, взятых на припае залива Грен-фьорд. Отбор образцов льда для последующего определения концентрации загрязняющих частиц производился кольцевым буром диаметром 20 см. Образцы (пробы) льда подготавливались непосредственно на льду после проведения измерений температуры льда. Ледяной керн помещался на специальный разделочный столик. На нем с использованием ручной ножовки из нержавеющей стали готовились образцы длиной порядка 10 см. При этом боковые поверхности керна, испытывающие при вынимании из лунки наибольший контакт с морской водой, предварительно срезались для получения репрезентативных оценок концентрации частиц (ми-

нимизация эффекта вымывания частиц из образца льда). Далее образцы помещались в герметичные пластиковые пакеты и доставлялись в ГМО «Баренцбург» для дальнейшего лабораторного анализа. Для определения концентрации взвешенных частиц в расплавленных образцах льда (пробы воды) использовались стандартные синтетические фильтры диаметром 42 мм и калиброванными отверстиями диаметром 0,45 мкм. Предварительная подготовка фильтров и последующая обработка фильтров с образцами взвеси (сушка, взвешивание) проводилась в Российско-Германской лаборатории им. О.Ю. Шмидта (ААНИИ). Использовалась стандартная муфельная печь и прецизионные электронные весы фирмы LA230S-OCЕ “Sartorius” (Германия), которые позволяют взвешивать фильтры с точностью $\pm 0,01$ мг. Фильтрация проб воды осуществлялась в химической лаборатории ГМО «Баренцбург» на стандартной фильтровальной установке. Для определения объема профильтрованной пробы использовалась мерная колба объемом 500 мл с ценой деления шкалы 25 мл. Фильтры с взвесью помещались в чашки Петри для транспортировки в ААНИИ.

Для исследования особенностей антропогенного загрязнения припайного льда пробы отбирались в разных частях залива Грен-фьорд. Основные источники антропогенного загрязнения припайного льда, как и в случае с загрязнением атмосферы, – это аэрозольные выбросы ТЭЦ, угольные отвалы, расположенные в районе мыса Финесет, а также угольные склады открытого хранения на территории поселка. Основной источник, безусловно, ТЭЦ. С учетом преобладающей розы ветров, особенностей стратификации в пограничном слое атмосферы, гранулометрического состава аэрозоля частицы, в основном, оседают на поверхности припая к югу от поселка. Аэрозольные частицы, попадая внутрь льда и на его поверхность, изменяют его альбедо, являются очагами внутрислойного таяния, что способствует ускоренному таянию ледяного покрова на акватории фьорда. При динамическом взломе припая (приливы, зыбь) частицы, находящиеся во льду, могут быть вынесены в соседние с Грен-фьордом акватории (залив Айс-фьорд, пролив Фрама). Минимальные концентрации частиц были зафиксированы в южной части фьорда 2,9 мг/л, максимальные на припае в районе поселка – 6,1 мг/л. Это, так называемые, средневзвешенные оценки по все толщине льда, которая изменялась от 85 до 65 см, соответственно. Несмотря на то что метод фильтрации расплавленных образцов льда (водяных проб) позволяет определить «общую» концентрацию взвешенных частиц в пробе (минерального и биологического происхождения), в нашем случае это именно аэрозольные частицы антропогенного происхождения, поскольку характерное для Арктики весеннее цветение водорослей в этот период (апрель) еще не наступило. Обращают на себя внимание и относительно невысокие максимальные значения концентрации по сравнению с оценками, полученными в 2009 и 2010 гг. Так, максимальные величины в 2010 г. достигали 30 мг/л, а в 2009 г. 60 мг/л. В апреле 2011 г. максимальные концентрации в отдельных слоях не превысили 8 мг/л. Полученные результаты обусловлены не только совершенствованием производ-

ственной деятельности на предприятиях треста «Арктик-Уголь» (новые фильтры и т.д.), но и рекультивацией угольных отвалов.

Измерения отражательной способности снежного покрова в условиях его загрязнения проводились с помощью стандартного пиранометров М-80 в диапазоне длин волн 0,3–3,0 мкм и пиранометрами LI-190SA и LI-192SA (США) в области видимых длин волн (0,3–0,7 мкм). Регистрация сигналов с датчиков осуществлялась многоканальным программируемым data-logger LICER-1400 (США).

Как показали результаты измерений, альbedo снежного покрова изменяется в широких пределах в зависимости от степени загрязненности поверхности. Данные, представленные в табл. 1, содержат осредненные по четырем градациям средние значения альbedo для диапазона 0,3–0,7 мкм. Отмечается уменьшение более чем в два раза величины альbedo свежеснежного покрова по сравнению с альbedo сильно загрязненного снежного покрова. В результате загрязнения увеличивается доля поглощенной снежной поверхностью солнечной радиации, что, соответственно, ускоряет процесс таяния снежного покрова.

Таблица 1

Результаты измерений альbedo в видимом диапазоне спектра над различными по степени загрязненности участками поверхности

Характеристика поверхности	Среднее значение альbedo, %
Свежеснежный покров	83
Слабо загрязненная поверхность	80
Умеренно загрязненная поверхность	64
Сильно загрязненная поверхность	41

Сравнение величин альbedo снежного покрова в поселке Баренцбург, где ведется угледобывающая деятельность, с аналогичными величинами, характерными для норвежского поселка Нью-Алесун, где осуществляются только научные исследования и аэрозольные выбросы сведены к минимуму, показало, что в среднем альbedo снега в диапазоне 0,3–3,0 мкм в Баренцбурге на 15–20 % меньше, чем в Нью-Алесуне. Результаты сравнения отражены на рис. 2.

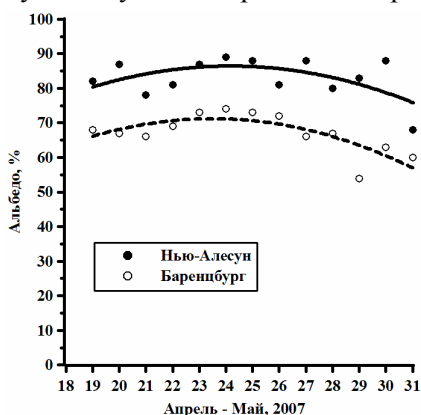


Рис. 2. Альbedo снега в поселках Баренцбург и Нью-Алесун в апреле 2007 г.

Исследование влияния загрязнения на проникающую вглубь снежного покрова солнечную радиацию включали в себя синхронные измерения приходящей, отраженной и проникающей радиации в видимом диапазоне длин волн. Измерения проникающей радиации проводились на глубине 5 см. В каждой точке наблюдений отбиралась проба снега из поверхностного 5-сантиметрового слоя для последующей фильтрации расплавленных образцов (проб воды) и определения уровня загрязнения (методика приведена выше). Актинометрические наблюдения проводились в различных местах поселка Баренцбург, которые отличались по степени загрязнения снега. Максимальное количество загрязняющих веществ было зафиксировано в районе склада открытого хранения угля, которое составило 1,93 г/л, минимальные значения загрязнения снега в поселке составили величину порядка 0,1 г/л.

Синхронные измерения приходящей, отраженной и проникающей солнечной радиации в видимом диапазоне позволили оценить величину ослабления радиации в верхнем пятисантиметровом слое с учетом количества загрязняющих частиц. Ослабление в верхнем 5-сантиметровом слое снега изменяется в широких пределах от 50 до 100 %. В интервале загрязнения от 0,12 г/л до 0,73 г/л не удалось четко выявить эффект увеличения ослабления проникающей радиации за счет поглощения углеродосодержащими частицами. Продолжение подобных натурных наблюдений и накопление новых данных позволит оценить зависимость.

Проведенные исследования радиационных свойств атмосферы, снежного и ледяного покровов показывают существенное влияние на радиационный баланс поверхности аэрозольных компонентов, попадающих в атмосферу и снежно-ледяной покров в результате добычи и сжигания угля. Подобное воздействие, безусловно, приводит к уменьшению фотосинтетической активной радиации, недостаток которой сказывается на здоровье жителей поселка. Установка на ТЭЦ современной системы дожигания топлива и новых фильтров заметно улучшила экологическую обстановку в поселке Баренцбург.

Литература

1. Хорева Е.И., Мостаманди С.В., Ронту Л., Бакланов А.А. Прямые аэрозольные эффекты в одномерной версии региональной метеорологической модели HIRLAM // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 22, с. 114-122.
2. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под ред. К.Я. Кондратьева. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 564 с.
3. Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 218 с.
4. <http://lasp.colorado.edu/>

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-05-00780_а, а также в рамках двухстороннего сотрудничества с Норвежским Полярным институтом (проект ARCDIV).