

Исследования дисперсного состава приводного аэрозоля Белого моря в конце летнего сезона 2007 г.

В.В. Польшкин¹, М.В. Панченко¹, И.В. Грищенко², В.Б. Коробов²,
А.П. Лисицын³, В.П. Шевченко^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²ГУ Архангельский ЦГМС-Р

163020, г. Архангельск, ул. Маяковского, 2

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36

Поступила в редакцию 18.06.2008 г.

Анализируется пространственно-временная изменчивость интегральных (счетная концентрация, массовая концентрация субмикронного аэрозоля, массовая концентрация микрокристаллического углерода) параметров и дисперсного состава (гранулометрия) аэрозольных частиц приводного слоя морской атмосферы Белого моря в августе–сентябре 2007 г. в 53-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш». Исследуется связь дисперсности аэрозоля с метеорологическими параметрами и синоптической ситуацией на протяжении ряда лет.

Ключевые слова: морской аэрозоль, распределение по размерам, массовая концентрация, счетная концентрация, сажевый аэрозоль.

Введение

Планомерность исследований приводного аэрозоля Белого моря диктуется чрезвычайной важностью каналов обмена и перераспределения аэрозольного вещества в северных полярных широтах Земли [1, 2]. Во-первых, Белое море своим географическим положением выделяется из всех арктических морей Северного полушария. Акватория моря имеет небольшую площадь и практически полностью окружена сушей, что существенным образом усиливает влияние на морские воды процессов на суше. Во-вторых, непосредственно в прибрежной зоне расположено несколько крупных населенных пунктов, выбросы и сбросы предприятий которых в больших объемах попадают в природную среду. И в-третьих, вследствие более южного положения Белого моря относительно остальных морей Северного Ледовитого океана имеются существенные климатические и океанологические отличия его природных условий от природных условий этих морей.

Изучение пространственно-временной изменчивости параметров аэрозольных частиц приводного слоя морской атмосферы Белого моря, связи дисперсности аэрозоля с метеорологическими параметрами и синоптической ситуацией проводилось на протяжении ряда лет [3–6]. В продолжение этих работ

в рамках проекта «Система Белого моря» и проекта № 323 Международного полярного года 2007/08 «Исследование эолового и ледового переноса и потоков вещества (включая экотоксиканты) в Арктике» в различных районах Белого моря в августе – сентябре 2007 г. в 53-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» выполнялись исследования по изучению микроструктуры, счетной концентрации и химического состава аэрозоля [7, 8].

Сравнение параметров приводного аэрозоля в разные годы, для различных районов Белого моря и в различных метеорологических и синоптических ситуациях позволяет получить более полное представление о разнообразии процессов, протекающих в исследуемом районе.

Аппаратура и методики

Исследование аэрозольных параметров проводилось вдоль маршрута НИС «Академик Мстислав Келдыш» (рис. 1) с помощью автоматизированного мобильного аэрозольного комплекса (аэрозольная станция) [9], который располагался в метеолaborатории по правому борту судна, на высоте около 16 м от водной поверхности в зоне наименьшего влияния локальных источников аэрозоля (выхлопная труба корабля, вентиляционные шахты машинного отделения и пр.). В состав комплекса входили модифицированный нефелометр углового рассеяния типа ФАН, автоматизированный фотоэлектрический счетчик частиц (ФСЧ) АЗ-5 и аэталометр (фотометр поглощения). Измерения велись круглосуточно каждые 0,5 ч.

* Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Ирина Васильевна Грищенко; Владимир Борисович Коробов (korobov@arh.ru); Александр Петрович Лисицын (lisitzin@ocean.ru); Владимир Петрович Шевченко (vshevch@ocean.ru).

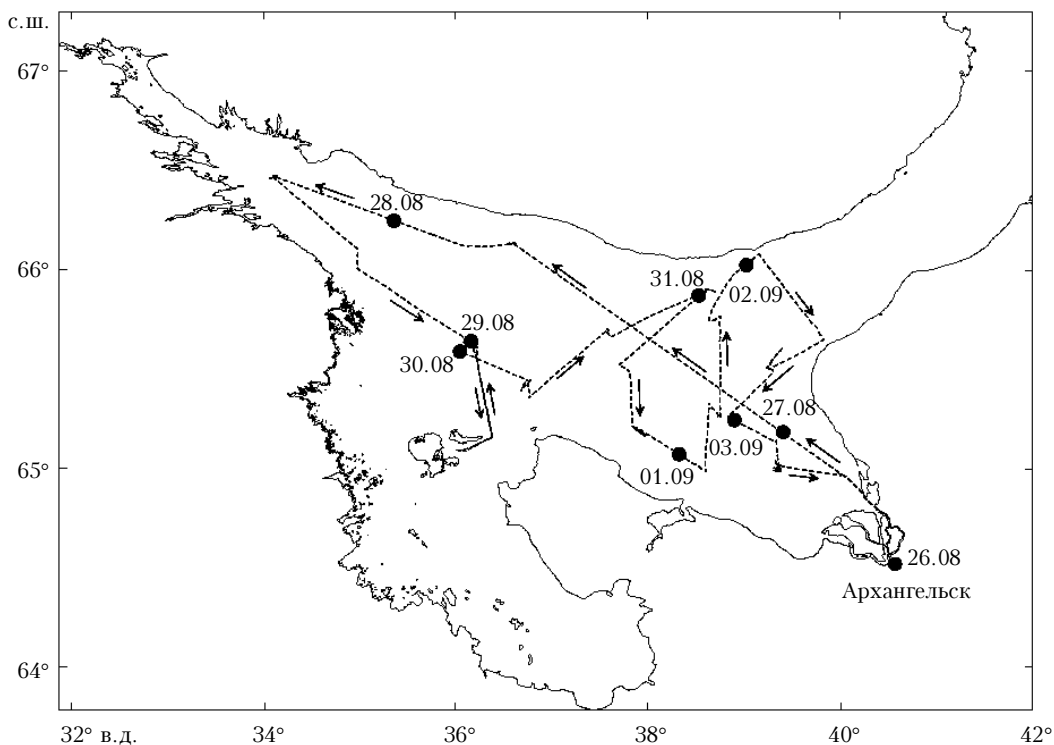


Рис. 1. Маршрут 53-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Белом море. Черными кружками отмечено положение судна на начало каждых суток с 26.08 по 03.09.2007 г.

Исследование дисперсного состава (гранулометрия) и счетной концентрации N_a (см^{-3}) аэрозоля осуществлялось с помощью автоматизированного ФСЧ в 256 измерительных диапазонах по размерам частиц от 0,4 до 10 мкм в диаметре. Нефелометр ФАН измерял коэффициент направленного аэрозольного рассеяния $\mu(45^\circ)$ ($\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$) под углом рассеяния 45° на длине волны 0,52 мкм. С помощью выражения из эмпирической модели атмосферных дымок ИФА РАН [10] определялись значения массовой концентрации субмикронного аэрозоля M_a ($\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$). Аэталометр использовался для измерений массовой концентрации микрокристаллического углерода M_C ($\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$) в атмосферном воздухе в реальном масштабе времени (принцип действия, как у прибора типа «aethalometer» [11]).

Синоптическая ситуация в период исследований

Синоптические условия над акваторией Белого моря в период с 25 августа по 3 сентября 2007 г. складывались следующим образом.

25 августа. Акватория Белого моря находилась под влиянием промежуточного гребня, наблюдался слабый рост давления, ветры северо-западные, слабые. К концу дня оказывала влияние передняя часть циклона с центром на севере Швеции (давление в центре 942 мбар). Циклон смещался на восток со скоростью 60–70 км/ч. Давление падало до 3,5 мбар за 3 ч. Наблюдались юго-западные ветры 7–12 м/с.

26 августа. Центр циклона сместился на Мезенский залив и далее на юго-восток. Над акваторией Белого моря давление выросло на 1,3–2,4 мбар за 3 ч. С тылом этого циклона были связаны юго-западные и западные ветры, в Кандалакшском заливе и Горле (сужение между Двинским и Мезенским заливами) — северные и северо-восточные ветры со средней скоростью 7–12 м/с, в Горле порывами до 17 м/с. На высоте оказывала влияние ложбина циклона над Карским морем, обуславливая западные и северо-западные ветры 10–15 м/с в слое 1,5–5,0 км.

27 августа. На акваторию Белого моря оказывала влияние северо-западная периферия вытянутой ложбины от циклона над Карским морем, которая прослеживалась до 500 мбар. Во второй половине дня в районе Архангельска на волне возник частный циклон, с которым было связано усиление северного, северо-восточного ветра на западе моря порывами до 16–17 м/с. Рост давления составил 1,6–2,5 мбар за 3 ч.

28 августа. Произошло вхождение на территорию Белого моря ядра антициклона с Кольского полуострова. Далее ядро сместилось на восток. Над морем наблюдались слабые ветры восточных румбов. На высоте по-прежнему сохранялась ложбина Карского циклона со слабыми северо-западными, западными ветрами.

29 августа. На море оказывала влияние северо-восточная периферия циклона, центр которого располагался в районе Санкт-Петербурга. В дальнейшем циклон смещался на северо-восток. С ним были связаны падение давления на 2,9 мбар за 3 ч

и северо-восточные ветры со средней скоростью 10–12 м/с, порывами до 15–16 м/с. Аналогичная ситуация наблюдалась и в средней тропосфере: над Карелией возник циклон, северо-восточная периферия которого определяла над акваторией Белого моря юго-восточные и восточные ветры 5–10 м/с.

30 августа. Центр циклона располагался над Двинским заливом с давлением 988 мбар, падение давления составило 3,3 мбар за 3 ч. На акватории Белого моря дул северный и северо-западный ветер со средней скоростью 10–12 м/с, в Кандалакшском заливе порывы ветра достигали 15–16 м/с. Во второй половине дня по мере смещения циклона на северо-восток над морем отмечался рост давления на 1,7 мбар за 3 ч. Ветер ослабел до 7–10 м/с.

31 августа. Акватория Белого моря находилась под влиянием тыла циклона с центром в районе Канина Носа как на высоте, так и у земли. Наблюдались рост давления на 1,0–1,6 мбар за 3 ч и северо-западные, западные ветры до 10–12 м/с.

1–2 сентября. Метеорологические условия определялись ложбиной циклона над Баренцевым морем, в которой наблюдались слабые ветры переменных направлений.

3 сентября. На акваторию Белого моря оказывала влияние восточная периферия обширного циклона над западом Норвегии, в ложбине которого над Карелией днем возник частный циклон, располагавшийся над Двинским заливом. Преобладали юго-восточные и восточные ветры 7–10 м/с.

Таким образом, в течение всего периода над акваторией Белого моря наблюдалась циклоническая циркуляция с кратковременным вхождением ядра высокого давления с Кольского полуострова.

Анализ экспериментальных данных

Общий временной ход основных измеряемых интегральных параметров и временные вариации приводных значений метеопараметров изображены на рис. 2.

Средние значения метеопараметров по всему массиву данных составили: $V = (9,2 \pm 3,5)$ м/с, $RH = (73,0 \pm 8,1)$ %, $T = (10,0 \pm 2,1)$ °С. Обращают на себя внимание повышенные значения основных интегральных измеряемых параметров в районе порта г. Архангельска во время отхода и прихода судна. На рис. 2, а эти данные отмечены светлыми кружками. Для этих моментов средние значения параметров были следующие: $M_a = (6,9 \pm 6,0)$ мкг · м⁻³, $N_a = (4,0 \pm 4,8)$ см⁻³, $M_C = (0,36 \pm 0,47)$ мкг · м⁻³. Темными кружками отмечены измерения, проведенные непосредственно в море. Для этого периода средние значения $M_a = (2,1 \pm 1,1)$ мкг · м⁻³, $N_a = (4,9 \pm 2,8)$ см⁻³, $M_C = (0,043 \pm 0,09)$ мкг · м⁻³. Видно, что средние значения и среднеквадратические отклонения (СКО) массовой концентрации сажи и аэрозоля в районе Архангельска в несколько раз выше, чем в открытом море. Для средних значений счетной концентрации наблюдается обратная ситуация, хотя поведение СКО счетной концентрации аналогично поведению СКО остальных параметров.

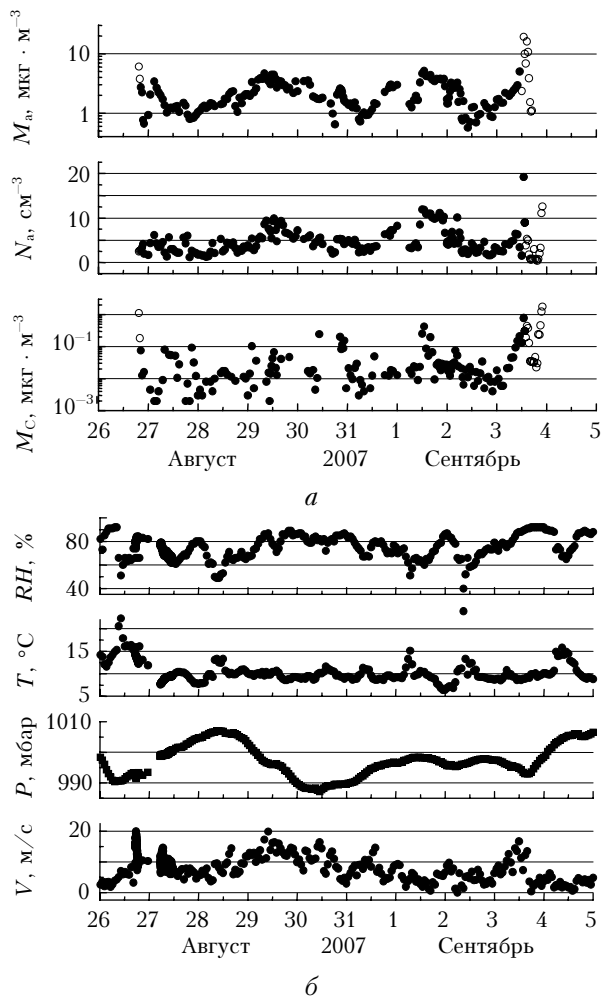


Рис. 2. Распределение параметров, измеренных на борту НИС «Академик Мстислав Келдыш»: а — массовая концентрация субмикронного аэрозоля M_a ; счетная концентрация частиц с диаметрами более 0,4 мкм N_a ; массовая концентрация микрокристаллического углерода M_C ; б — относительная влажность воздуха RH ; температура воздуха T ; давление P ; скорость ветра V

Для анализа поведения функции распределения частиц по размерам нами были рассчитаны распределения по объемам $\Delta V_i / \Delta R_i$, где $\Delta V_i = (4/3)\pi R_i^3 \Delta N_i$ — объем частиц в i -м поддиапазоне измерения (R_i — среднее значение радиуса частиц i -го поддиапазона; ΔN_i — концентрация частиц в i -м поддиапазоне; ΔR_i — размер i -го поддиапазона). Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Видно, что во время отхода судна в рейс в Архангельске (26 августа 2007 г.) функция распределения частиц по объемам имела минимальные значения, в особенности для грубодисперсного диапазона ($R > 1$ мкм). При этом волнение морской поверхности было минимальным. А резкий всплеск скорости ветра 26 августа, начавшийся в 17.00 и прекратившийся в 18.30, не повлиял на значения функции распределения в грубодисперсном диапазоне, так как скорость ветра к началу измерений в 19.30 стала меньше 10 м/с (рис. 2, б). Во время прихода судна в Архангельск (3 сентября 2007 г.) значения

функции распределения максимальны как в субмикронной, так и в грубодисперсной областях размеров. Отмеченные особенности в поведении интегральных параметров в отличие от M_a и N_a и функции распределения объясняются, скорее всего, наличием в районе Архангельска 3 сентября высоких концентраций мелкодисперсных частиц антропогенного происхождения размерами меньше нижней границы чувствительности ФСЧ (0,4 мкм).

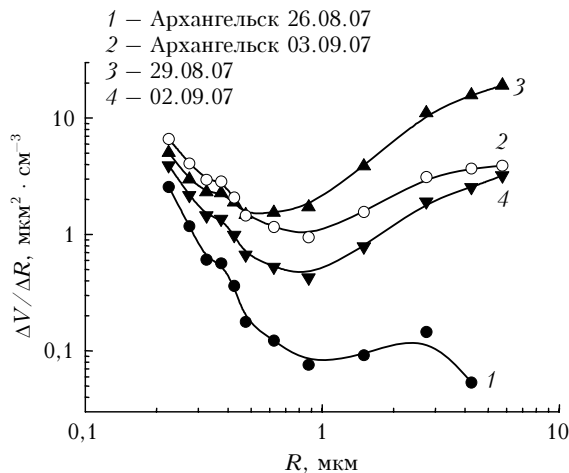


Рис. 3. Распределение аэрозольных частиц по объемам для ситуации с максимальными (29.08.2008) и минимальными (02.09.2008) скоростями ветра, а также во время отхода и прихода судна в Архангельск

Циклоническая циркуляция с прохождением фронтов в период измерений в открытом море вызвала рост скорости ветра и волнения моря, привела к усилению генерации частиц аэрозоля с морской поверхности как грубодисперсного, так и мелкодисперсного диапазонов (пузырьковый механизм, срывание брызг и пены морской воды с последующим высыханием). Наиболее ярко это проявилось 29 августа и 1 сентября (см. рис. 2, а). Наблюдались значения $M_a^{\max} = 5,2 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, $N_a^{\max} = 11,9 \text{ см}^{-3}$ (1 сентября). При этом следует отметить практически нейтральное, хотя и с большой дисперсией, поведение M_C .

Наиболее контрастными по скорости ветра явились дни 29 августа и 2 сентября 2007 г. Средние значения скорости ветра в эти дни составили соответственно 13,5 и 4,8 м/с. Значения основных измеряемых параметров для этих дней были следующие: 29 августа — $M_a = (3,3 \pm 0,7) \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, $N_a = (6,7 \pm 2,0) \text{ см}^{-3}$, $M_C = (0,03 \pm 0,03) \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$; 2 сентября — $M_a = (1,57 \pm 0,8) \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, $N_a = (3,9 \pm 1,9) \text{ см}^{-3}$, $M_C = (0,02 \pm 0,002) \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$. Для этих дней были рассчитаны средние распределения аэрозольных частиц по объемам (см. рис. 3).

Высокие значения скорости ветра приводят к увеличению объемов субмикронных, а в особенности грубодисперсных частиц. Если объемы субмикронных частиц увеличились в 1,2–2 раза, то объемы грубодисперсных в 3–6 раз.

Представляет интерес сравнить среднегодовые распределения аэрозольных частиц по объемам, полу-

ченные за несколько лет наблюдений (2003–2007 гг.) (рис. 4).

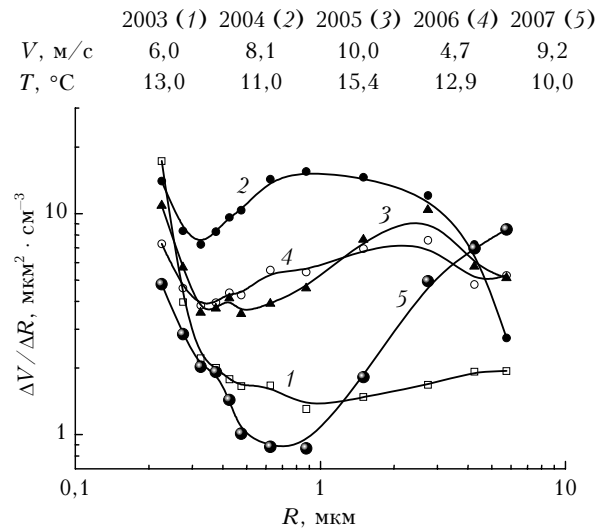


Рис. 4. Распределение аэрозольных частиц по объемам для летнего сезона разных лет

Все данные получены в разные годы во второй половине августа. Дополнительно на рис. 4 представлены также средние значения температуры T ($^\circ\text{C}$) и скорости ветра V (м/с) по массиву для каждого года. Рис. 4 иллюстрирует значительные качественные различия в распределениях разных лет.

Отличительной особенностью распределений для 2004–2006 гг. являются высокие значения для всего спектра размеров. В 2003 и 2007 гг. наблюдается резкое уменьшение значений в субмикронной области в диапазоне радиусов от 0,2 до 1 мкм. В области радиусов частиц более 1 мкм для 2007 г. отмечается самый большой рост распределения по объемам, а в 2003 г. самый малый.

Аппроксимация полученных распределений исходила из представления о двух фракциях — субмикронной и грубодисперсной — в виде двух логарифмически нормальных распределений. Субмикронная область аппроксимируется распределениями с дисперсией от 0,6 (2003 г.) до 1,0 (2005, 2006 гг.) и модальными радиусами от 0,01 (2006, 2007 гг.) до 0,1 мкм (2004 г.). Грубодисперсная часть распределений аппроксимируется более широкими распределениями с дисперсией от 1,0 (2004, 2005, 2007 гг.) до 1,2 (2003, 2006 гг.) и с модальными радиусами от 1–3 (2004–2006 гг.) до 6 мкм для 2003 г. и до 10 мкм в 2007 г.

Следует отметить, что данные 2004–2006 гг. включают в себя измерения при больших относительных влажностях воздуха и наличии туманов, поэтому распределения для этих лет в области радиусов 0,4–1 мкм высокие. Именно в этой области размеров во время туманов происходит рост частиц.

Высокие значения функции распределения для этих лет в грубодисперсной области обусловлены наличием больших скоростей ветра (исключением является 2006 г.). В 2003 и 2007 гг. в период проведения экспериментальных работ туманы практически

не наблюдались и прозрачность атмосферы была достаточно высокой, при этом в 2003 г. средняя скорость ветра была всего 6 м/с, а в 2007 г. — 9 м/с. В связи с этим функции распределения в области радиусов 0,4–1 мкм для 2003 и 2007 гг. имеют низкие значения, а в грубодисперсной области 2007 г. — высокие.

Заключение

Анализ временного хода интегральных параметров и функций распределений приводного морского аэрозоля Белого моря выявил хорошую чувствительность этих параметров к синоптической, метеорологической ситуации и к месту проведения измерений относительно континентальных и антропогенных источников аэрозоля в период измерений.

С усилением скорости ветра до 10 м/с и выше возрастают значения интегральных параметров и функции распределения аэрозольных частиц по размерам. Причем увеличение объемов частиц происходит главным образом в грубодисперсном диапазоне радиусов более 1 мкм.

В районах, близких к континентальным и промышленным источникам аэрозоля, рост значений интегральных параметров и функции распределения обеспечивается главным образом увеличением объемов частиц субмикронного диапазона радиусами менее 0,2 мкм.

Высокая относительная влажность воздуха и наличие туманов приводят к росту объемов частиц среднедисперсного диапазона радиусов 0,4–1 мкм.

Авторы признательны экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш» за помощь во время экспедиции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 06-05-64815 и 07-05-00691, грант № 06-05-64393), гранта поддержки ведущих научных школ НШ-361.2008.5, программ фундаментальных исследований Президиума РАН № 16, часть 2, и № 17 (проекты 4.4 и 17.1), проекта «Наночастицы во внешних и внутренних сферах Земли», Российско-германской лаборатории им. О. Шмидта.

1. Лисицын А.П. Новые возможности четырехмерной океанологии и мониторинга второго поколения — опыт двухлетних исследований на Белом море // Актуальные проблемы океанологии / Гл. ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2003. С. 503–556.
2. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.

3. Польшкин В.В., Польшкин Вас.В., Панченко М.В., Козлов В.С., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Аэрозольные исследования в 55-м рейсе НИС «Профессор Штокман» в Белое море: Тезисы докл. // XV Междунар. науч. школа морской геологии «Геология морей и океанов», Москва, 17–21 ноября 2003 г. М.: ГЕОС, 2003. Т. 2. С. 112–113.
4. Польшкин В.В., Голобокова Л.П., Козлов В.С., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Панченко М.В., Пескова М.А., Ходжер Т.В., Шевченко В.П. Оценка связи микрофизического и химического состава для приводного аэрозоля Белого моря // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 377–385.
5. Польшкин В.В., Голобокова Л.П., Погодаева Т.В., Козлов В.С., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Панченко М.В., Пескова М.А., Ходжер Т.В., Шевченко В.П. Состав аэрозолей приводного слоя атмосферы над Белым морем во второй половине августа 2003 и 2004 гг. // Фундаментальные исследования океанов и морей / Гл. ред. Н.П. Лаверов. Кн. 2. М.: Наука, 2006. С. 413–439.
6. Kozlov V.S., Tikhomirov A.B., Pol'kin V.V., Panchenko M.V., Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P. Aerosol study of the White Sea surface atmosphere in the 80th cruise of the research vessel «Professor Shtokman» // XIV Int. Symp. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics»: Abstracts. Tomsk: IAO SB RAS, 2007. P. 127.
7. Польшкин В.В., Голобокова Л.П., Панченко М.В., Козлов В.С. Приводный аэрозоль Белого и Карского морей (предварительный анализ результатов исследования в 53-м и 54-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш»): Тезисы докл. // XIV Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск: ИОА СО РАН, 2007. С. 11.
8. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Горюнова Н.В., Замбер Н.С., Коробов В.Б., Куценогий К.П., Немировская И.А., Новигатский А.Н., Панченко М.В., Поздняков С.А., Соколов В.Т. Эоловый и ледовый перенос и потоки вещества (включая экотоксиканты) в Арктике — результаты исследований последних лет и планы работ на ближайшие годы: Тезисы докл. // Научн. конф. «Россия в МПГ — первые результаты». Сочи, 3–9 октября 2007 г. С. 103–104.
9. Козлов В.С., Панченко М.В., Польшкин В.В., Шмаргунов В.П. Мобильный аппаратный комплекс для оперативных измерений концентраций аэрозоля и сажи в приземном слое воздуха: Тезисы докл. // XIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск: ИОА СО РАН, 2006. С. 58.
10. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.
11. Hansen A.D.A., Rosen H., Novakov T. The aethalometer — an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles // Sci. Total Environ. 1984. V. 36. N 1. P. 191–196.

V.V. Pol'kin, M.V. Panchenko, I.V. Grishchenko, V.B. Korobov, A.P. Lisitsyn, V.P. Shevchenko.
Study of disperse composition of near-water aerosol over White Sea in the end of summer, 2007.

Spatial-temporal variability of the integral parameters (number density, mass concentration of submicron aerosol, mass concentration of crystal carbon) and the disperse composition (granulometry) of aerosol particles in the near-water layer of the marine atmosphere over White Sea in August – September 2007 in 53-d cruise of the research vessel «Akademik Mstislav Keldysh» is analyzed. Relations of the aerosol dispersity with meteorological parameters and synoptic conditions during several years is studied.