

А.И. Бородулин<sup>1</sup>, А.С. Сафатов<sup>1</sup>, Б.Д. Белан<sup>2</sup>, М.В. Панченко<sup>2</sup>,  
В.В. Пененко<sup>3</sup>, Е.А. Цветова<sup>3</sup>

## Высотные профили концентрации биоаэрозолей в тропосфере юга Западной Сибири

<sup>1</sup>НИИ аэробиологии ГНЦ ВБ «Вектор», пос. Кольцово Новосибирской обл.

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 9.02.2005 г.

Представлен анализ высотных профилей концентрации аэрозолей суммарного белка и жизнеспособных микроорганизмов, полученных в результате обработки данных наблюдений за концентрациями тропосферных биоаэрозолей в 1999–2003 гг. Выполнены расчеты по моделированию возможных путей попадания исследуемых субстанций в район наблюдений, подтверждающие тот факт, что высотные профили концентраций представляют собой уникальные отпечатки состояния атмосферы Северного полушария, в которых отражена информация об источниках биоаэрозолей и о процессах их трансформации в атмосфере.

### Введение

С декабря 1998 г. и по настоящее время НИИ аэробиологии ГНЦ ВБ «Вектор» и Институт оптики атмосферы СО РАН проводят систематический мониторинг тропосферных биоаэрозолей на юге Западной Сибири. В конце каждого месяца в дневное время в точке с координатами 54°23' с.ш. и 82°09' в.д. на высотах  $h = 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5,5$  и 7 км с помощью самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» производится отбор проб атмосферного воздуха и определяется содержание в них суммарного белка и жизнеспособных микроорганизмов. С методическими вопросами и обобщенными результатами исследований можно познакомиться в [1, 2].

Полученный массив данных позволил выявить сезонные изменения концентрации биоаэрозолей в тропосфере. В частности, было показано, что суммарное количество атмосферного белка имеет минимальное значение зимой. Весной, с пробуждением растительного и животного мира, оно монотонно растет, и к лету, началу осени концентрация атмосферного белка достигает своего максимума, на порядок превосходящего зимние значения. Глубокой осенью концентрация атмосферного белка падает до исходного уровня. Среднемесячные концентрации белка плавно (в течение 4–5 мес) растут до своего максимального значения, наблюдающегося в августе–сентябре, и затем резко (в течение 2 мес) падают до типичных зимних значений. Это не соответствует максимальной активности животных и растительности в данном регионе, приходящейся на период май–август. Преобладание в нашем регионе юго-западных ветров делает правомерной гипотезу о существенном влиянии источников атмосферного белка, находящегося вне территории Западной Сибири. Действительно, если следовать розе ветров, то такие источники должны быть расположены в регионе Центральной Азии, где раститель-

ный и животный мир максимально активен большую часть года. Аналогичные выводы были сделаны и для аэрозолей жизнеспособных микроорганизмов.

Для количественного обоснования сделанных предположений был выполнен цикл исследований по оценке возможного нахождения источников с помощью методов обратного моделирования в сочетании с методами теории чувствительности моделей и функционалов. Исследования проводились на базе комплекса математических моделей ИВМиМГ СО РАН. Использовались полусферные версии моделей переноса примесей в атмосфере в рамках эйлерова и лагранжева подходов [3, 4].

Среди методов математического моделирования, используемых для решения задач типа «рецептор–источник», можно выделить три направления:

- 1) метод обратных траекторий;
- 2) методы, основанные на использовании сопряженных уравнений в трактовке Г.И. Марчука;
- 3) методы, основанные на вариационных принципах, которые порождают комбинированные алгоритмы прямого и обратного моделирования, и методы теории чувствительности.

Традиционный метод моделирования траекторий в рамках лагранжева подхода достаточно хорошо описан (см. например, обзоры [5–7] и ссылки в них). Чаще всего с его помощью рассчитываются траектории частиц, выпускаемых из источника. Применение этого метода для расчета обратных траекторий ограничено тем, что само понятие траекторий в обратном времени при решении задач типа «рецептор–источник» для моделей переноса и турбулентного обмена некорректно. Об обратных траекториях в традиционном понимании, которые рассчитываются по вектору скорости в обратном времени, имеет смысл говорить только для адвективной части моделей распространения примесей и в предположении, что несущая среда несжимаема. Заметим, что в моделирующей системе HYSPLIT

[8, 9], которая получила широкое распространение среди пользователей, поскольку разрешает открытый доступ на сайте NOAA, это обстоятельство учтено. Более конкретно проблема траекторий обсуждалась в работе [10], где приведен пример, подтверждающий тезис о том, что траекторные методы отличаются чрезвычайно высокой чувствительностью к вариациям входных параметров. Как указывает автор статьи, даже при моделировании в прямом времени на детерминированных пространственно гладких полях скоростей происходит хаотизация траекторий. Это обстоятельство ставит под сомнение вопрос о применимости методов обратных траекторий для задач типа рецептор–источник.

С таких позиций второе направление имеет преимущество, поскольку работает с моделями эйлерова типа [10–12]. Основной элемент в нем – сопряженные задачи, определяемые соотношениями двойственности для линейных функционалов типа тождества Лагранжа, которые решаются в обратном времени. В качестве источников в сопряженных задачах обычно задаются функции, отражающие конфигурацию и информационную суть рецепторов.

Более универсальный подход развивается в ИВМиМГ СО РАН [3, 4, 13, 14]. Он базируется на вариационных принципах в сочетании с методами теории чувствительности и применим для линейных и нелинейных функционалов и моделей как эйлерова, так и лагранжева типов. Заметим, что в этом подходе модели процессов рассматриваются в качестве ограничений на множество функций состояния и параметров. В свою очередь, сопряженные функции играют роль обобщенных множителей Лагранжа для учета различных ограничений в рамках вариационного принципа. В формировании функционалов участвуют также «модели наблюдений», выражающие соотношения между измеряемыми в областях-рецепторах величинами и функциями состояния моделей процессов.

Ядро этого подхода составляет комбинированный алгоритм прямого и обратного моделирования [13]. Сопряженные задачи в нем порождаются вариационным принципом для выбранной совокупности функционалов, а функции чувствительности рассчитываются с использованием решений возникающих при этом прямых и сопряженных задач. Одна из модификаций общего алгоритма, предназначенная для обнаружения источников, описана в [14, 15].

Для вычислительных экспериментов настоящей статьи по трассированию дальнего переноса применялся оригинальный метод обратного моделирования в лагранжевой формулировке, основанной на вариационном принципе и решении порождаемых им сопряженных задач [3, 4]. В нем сочетаются алгоритм с неявной схемой второго порядка точности по времени для детерминированного расчета траекторий в адвективно-переносной части модели процессов и алгоритм типа Монте-Карло для турбулентной части модели. Этот комплекс построен на принципах локальной аппроксимации прямых и сопряженных уравнений в приближении метода расщепления модели в целом. Детальное изложение метода дано в [3, 4].

Резюмируя анализ особенностей различных подходов, следует еще раз подчеркнуть, что с адвективно-диффузионными моделями в обратном времени можно работать только через сопряженные задачи. Именно такие алгоритмы (и в теоретическом плане и конструктивно) дают корректную информацию о связях между рецепторами и источниками. Для организации сценариев моделирования результаты измерений на отдельных высотах и суммарные по высоте и времени проведения наблюдательных экспериментов данные представляются в виде функционалов на множестве функций состояния. Сценарии обратного моделирования рассчитывались на 30 сут в обратном времени от момента проведения наблюдений.

Восстановление пространственно-временной структуры атмосферы осуществлялось с дискретностью 30 мин по времени с помощью системы [14] на базе совместного использования модели гидротермодинамики атмосферы в системе координат, следящей за рельефом поверхности Земли, и данных Реанализа NCEP/NCAR [16] за эти периоды. С помощью моделей эйлерова типа в режиме обратного моделирования рассчитывались функции чувствительности выбранного набора функционалов к вариациям параметров источников. Далее, по уровням значимости и областям-носителям этих функций оценивались области возможного расположения источников примеси, от которых могли быть зафиксированы наблюдаемые концентрации биоаэрозолей.

На базе детерминированно-стохастических моделей лагранжева типа, представляющих собой комбинацию алгоритмов детерминированного переноса субстанций по траекториям движения воздушных масс и метода Монте-Карло для воспроизведения стохастической структуры турбулентности, были рассчитаны сопряженные (в обратном времени) траектории, исходящие из точек измерения, где осуществлялся отбор проб [2].

При выборе срока в 30 дней в численных экспериментах мы руководствовались следующими соображениями:

- 1) оценками характерных времен жизни исследуемых субстанций,
- 2) результатами расчетов функций чувствительности.

Анализировались уровни значимости этих функций при различных вариантах задания функционалов для описания рецепторов и режима наблюдений. В результате был выбран компромиссный вариант.

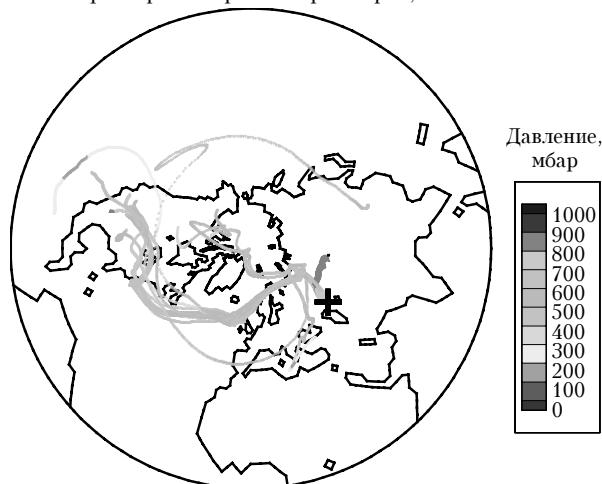
Расчетный шаг дискретизации 30 мин определен в качестве базового. Он является приемлемым из условий аппроксимации. Однако следует отметить, что все алгоритмы в нашем комплексе моделей, используемое для расчетов, являются адаптивными. Поэтому шаги по времени в схемах расщепления выбираются в зависимости от интенсивности процессов. Интервал 30 мин назначен для встречи всех стадий расщепления, работающих с «подсеточными», по отношению к базовому

интервалу, временными шагами. Такая организация алгоритмов продиктована вариационным принципом.

Анализ поведения рассчитанных траекторий показывает, что воздушные массы, пришедшие в точку отбора проб, имеют различную предысторию. В процессе своего движения они находятся на различных высотах, над различными участками поверхности (часто даже над различными континентами и океанами), и только по мере приближения к точке отбора проб траектории сближаются и сходятся в одну точку. Следовательно, в точку измерения действительно могут попасть аэрозольные частицы, поступающие в атмосферу из различных источников. Поскольку частицы микронного диапазона размеров могут находиться в атмосфере довольно долго, они вполне могут достигнуть точки наблюдений вместе с воздушными массами.

В процессе движения частицы перемещаются с одной высоты на другую, попадают в приземный слой (где, очевидно, и происходит обогащение биоаэрозолями), в определенных местах происходит их интенсивное перемешивание (для каждой обратной траектории эти места различны), после чего такие массы достигают точки измерения. Пример расчета сопряженных обратных траекторий приведен на рис. 1, из которого видно, что в регион наблюдений могут попадать аэрозоли, рожденные не только в Средней Азии, но и в Африке, и даже на Американском континенте. Следует заметить, что результат расчетов нужно рассматривать как ориентировочную оценку возможных путей миграции примесей.

Сопряженная задача, вариант Лагранжа модели переноса  
Четырехмерные обратные траектории, 1.07–29.07.1999



54.23° с.ш., 82.09° в.д., 1500 м, 29.07.1999, 08.00 по Гринвичу  
Рис. 1. Пример обратных траекторий движения воздушных масс, рассчитанных для высоты 1,5 км на 29 июля 1999 г. Точка отбора проб выделена крестиком

Для обнаружения конкретных источников, являющихся причиной появления идентифицированных с помощью наблюдений субстанций, недостаточно иметь информацию только от одного рецептора или от совокупности близко расположенных рецепторов, как это имеет место в рассматриваемой серии наблюдательных экспериментов. Чтобы по-

высить достоверность выводов, необходимо планировать наблюдательные эксперименты и иметь возможность проведения измерений в дополнительных рецепторах [10, 14].

Качественный анализ полученных данных показал, что значения концентрации суммарного белка и десятичного логарифма концентрации жизнеспособных микроорганизмов имеют значительный разброс, и в отдельных экспериментах не выявляется явной зависимости концентрации биоаэрозолей от высоты наблюдений. Наблюдаемый разброс значений обусловлен статистической природой процесса рассеяния атмосферных примесей — турбулентностью атмосферы, а также погрешностями измерений, приводящими к дополнительному разбросу наблюдаемых значений концентрации.

Статистические свойства полей концентрации биоаэрозолей были исследованы в [17]. В частности, было показано, что распределение концентрации аэрозолей суммарного белка подчиняется законам непрерывной статистики: описывается аналитическим решением уравнения Фоккера—Планка—Колмогорова [18] и может быть с достаточной степенью точности аппроксимировано логарифмически-нормальным законом. В свою очередь распределение концентрации аэрозолей жизнеспособных микроорганизмов адекватно описывается в рамках дискретной статистики Пуассона.

Стандартное отклонение погрешностей измерений концентрации аэрозолей суммарного белка составляет 0,2 мкг/м<sup>3</sup> от наблюдаемых значений. Погрешности определения концентрации жизнеспособных микроорганизмов традиционно оцениваются 95%-м доверительным интервалом, в пределах которого находится разброс десятичного логарифма наблюдаемых значений концентрации, измеряемой в штуках на м<sup>3</sup>. В нашем случае 95%-й доверительный интервал по порядку величины составляет менее половины десятичного логарифма.

В статье представлены высотные профили концентрации аэрозолей суммарного белка и жизнеспособных микроорганизмов, полученные с помощью процедуры усреднения массива данных наблюдений за концентрацией тропосферных биоаэрозолей в 1999–2003 гг. и обсуждаются их свойства.

Источники биоаэрозолей находятся в достаточно точном приповерхностном слое атмосферы и в основном обусловлены деятельностью растительного и животного мира. И если бы не было влияния циркуляционных процессов в атмосфере, то профили наблюдаемых концентраций биоаэрозолей представляли бы собой монотонно убывающие с высотой функции.

На рис. 2 приведены нормированные высотные профили концентрации аэрозолей суммарного белка  $C_p$  и концентрации аэрозолей жизнеспособных микроорганизмов  $C_{mn}$ . Данные получены усреднением по годам измерений с последующей нормировкой ежемесячных данных на средние по высотам значения и окончательно усреднены по месяцам наблюдений. Нормировка на средние по высотам значения произведена для исключения влияния

сезонных изменений концентрации на высотные профили. Усреднение по годам и месяцам позволяет проявить некоторые закономерности высотного изменения концентрации биоаэрозолей, не выявляющиеся в отдельных реализациях.

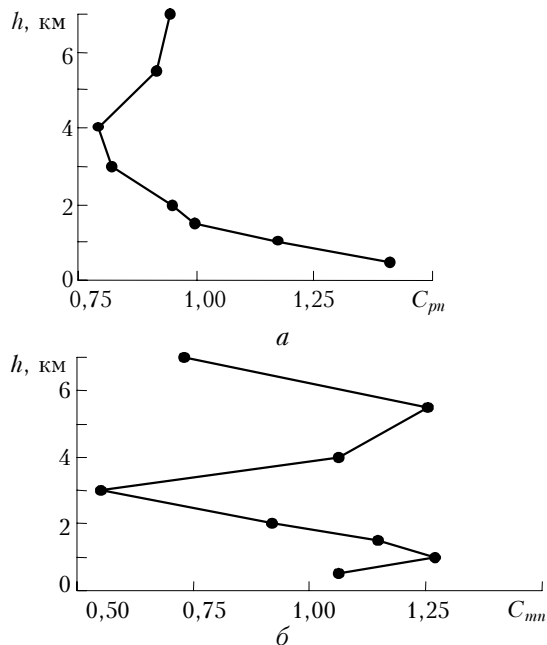


Рис. 2. Нормированные высотные профили концентрации аэрозолей суммарного белка  $C_{pn}$  (а) и жизнеспособных микроорганизмов  $C_{mn}$  (б)

Из рис. 2,а следует, что суммарный за пять лет профиль концентрации аэрозолей суммарного белка имеет максимальное значение на высоте 0,5 км, а затем концентрация уменьшается с высотой. Это указывает на то, что основные источники аэрозолей суммарного белка действительно располагаются вблизи подстилающей поверхности. Однако источники аэрозолей суммарного белка действуют как в нашем регионе, так и на больших расстояниях от точки наблюдения. Это подтверждает значительное количество суммарного белка в зимние месяцы, когда наблюдается снежный покров в Западно-Сибирском регионе.

На рис. 3 приведены нормированные высотные профили концентрации аэрозолей суммарного белка  $C_{pn}$  и концентрации аэрозолей жизнеспособных микроорганизмов  $C_{mn}$  с разделением по годам измерений. Для удобства анализа данных профили каждого последующего года смещены вправо от данных за 1999 г.

В той или иной степени это свойство проявляется на годовых профилях концентрации (рис. 3,а). Из рис. 2,а и 3,а видно, что как на суммарный за 1999–2003 гг. профиль, так и на годовые профили накладываются отдельные локальные максимумы концентрации, которые связаны со сложными траекториями движения воздушных масс в атмосфере (см. обсуждение этого вопроса во введении к статье). Отметим также, что в высотном профиле 2001 г. наблюдается почти монотонное падение концентрации с высотой.

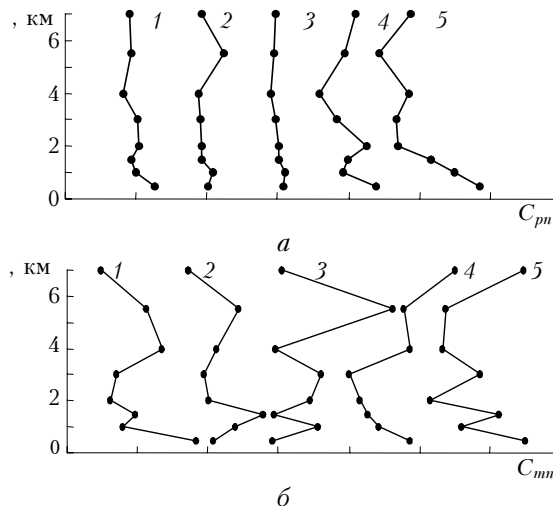


Рис. 3. Нормированные высотные профили концентрации аэрозолей суммарного белка  $C_{pn}$  (а) и жизнеспособных микроорганизмов  $C_{mn}$  (б) в зависимости от года наблюдений. Цифрами 1–5 отмечены 1999–2003 гг. измерений

В свою очередь высотные профили концентрации аэрозолей жизнеспособных микроорганизмов (см. рис. 2,б и 3,б) показывают, что закономерности формирования их полей, вероятно, более сложные по сравнению с аэрозолями суммарного белка (рис. 2,а, 3,а). Тенденция падения концентрации аэрозолей жизнеспособных микроорганизмов с высотой практически отсутствует на высотных профилях  $C_{mn}$ . Вместе с тем они иссечены максимумами концентрации от многочисленных «приподнятых эффективных» источников. На суммарном за пять лет профиле  $C_{mn}$  выделяются две эффективные высоты источников – 1,0 и 5,5 км.

Начиная с 2001 г. нами также проводится мониторинг атмосферных биоаэрозолей на территории ГНЦ ВБ «Вектор» в пос. Кольцово Новосибирской области. Несмотря на то что ежемесячные измерения на территории «Вектора», в отличие от самолетного зондирования, проводятся в середине месяца, а рельефы местности различны и точки измерений разнесены на расстояние порядка 100 км, для дополнения информации о высотных профилях концентрации представляет интерес сравнение усредненных по годам значений концентрации биоаэрозолей.

В таблице приведены средние значения и стандартные отклонения концентрации аэрозолей суммарного белка и десятичного логарифма концентрации жизнеспособных микроорганизмов, полученные в приземном слое на территории ГНЦ ВБ «Вектор» и в точке самолетного зондирования на высоте 0,5 км, усредненные за 2001, 2002 и 2001–2003 гг. измерений.

Выше отмечено, что если не принимать во внимание сложную динамику перемешивания воздушных масс, то значения концентрации в приземном слое атмосферы должны быть больше, чем на высоте 0,5 км. Из данных, приведенных в таблице, видно, что для аэрозолей суммарного белка наблюдается обратная зависимость, а данные о концентрации аэрозолей жизнеспособных микроорганизмов

**Средние плюс-минус стандартные отклонения концентрации биоаэрозолей в приземном слое на территории ГНЦ ВБ «Вектор» и в точке самолетного зондирования на высоте 0,5 км, усредненные по годам измерений**

Год	Концентрация			
	суммарного белка, мкг/м <sup>3</sup>		жизнеспособных организмов, десятичный логарифм, шт./м <sup>3</sup>	
	в приземном слое	<i>h</i> = 0,5 км	в приземном слое	<i>h</i> = 0,5 км
2001	2,07±2,84	3,41±3,34	3,32±3,14	3,38±1,10
2002	0,38±0,36	2,23±2,18	3,52±0,69	3,47±0,94
2003	0,32±0,33	3,38±2,50	3,27±0,63	3,37±0,61
2001–2003	1,36±2,18	3,01±2,72	3,15±0,62	3,34±0,86

за 2002–2003 гг. и усредненные за 2001–2003 гг. на этих уровнях сравнимы по величине. Следовательно, сопоставление данных о концентрациях суммарного белка и жизнеспособных микроорганизмов в приземном слое и на нижней границе тропосферы указывает на существенное влияние атмосферных процессов, в результате чего определяющую роль в формировании фона биоаэрозолей в нашем регионе могут играть удаленные источники.

Таким образом, каждый из полученных высотных профилей концентрации биоаэрозолей, в том числе и ежегодных, представляет собой уникальный отпечаток состояния атмосферы Северного полушария, в котором в обобщенном виде содержится информация об огромном количестве возможных источников биоаэрозолей и о процессах их трансформации в атмосфере.

Исследования выполняются в рамках: проектов РФФИ (04-05-64562, 04-05-64559, 04-05-08010); по программам 13 Президиума РАН и 1.3.2. Отделения математики РАН; междисциплинарного проекта СО РАН № 130 «Экологические проблемы городов Сибири». Авторы выражают благодарность указанным выше фондам за поддержку данных исследований.

1. Андреева И.С., Белан Б.Д., Бородулин А.И., Буряк Г.А., Марченко Ю.В., Олькин С.Е., Панченко М.В., Петрищенко В.А., Пьянков О.В., Резникова И.К., Сафатов А.С., Сергеев А.Н., Степанова Е.В. Изучение изменчивости биогенной компоненты атмосферного аэрозоля над лесными массивами Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 639–644.
2. Андреева И.С., Бородулин А.И. и др. Биогенная компонента атмосферного аэрозоля на юге Западной Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10. № 5. С. 547–561.
3. Пененко В.В., Цветова Е.А. Моделирование процессов переноса примесей в прямых и обратных задачах климатологического мониторинга и прогнозирования // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 482–488.
4. Пененко В.В., Цветова Е.А. Некоторые аспекты решения взаимосвязанных задач экологии и климата // Прикл. мех. и техн. физ. 2000. Т. 41. № 5. С. 161–170.

5. Pielke R.A., Lyons W.A., McNider R.T., Moran M.D., Moon D.A., Stocker R.A., Walko R.L., Uliasz M. Regional and mesoscale meteorological modeling as applied to air quality studies // Proc. NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Dispersion Modeling and its Application. 1990. Vancouver, British Columbia. Canada. P. 1–33.
6. Rodean H.C. Stochastic Lagrangean models of turbulent diffusion. American Meteorological Society, Boston. 1996. 84 p.
7. Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories – a review and bibliography // Atmos. Environ. 1998. V. 32. N 6. P. 447–466.
8. Draxler R.R., Hess G.D. Description of Hysplit 4 modelling system. NOAA Technical Memorandum ERL-224. 1988. 24 p.
9. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the Hysplit 4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition // Austral. Meteorol. Magazine. 1998. N 47. P. 295–308.
10. Pudykewicz J.F. Application of adjoint tracer transport equations for evaluating source parameters // Atmos. Environ. 1998. V. 32. N 17. P. 3039–3050.
11. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
12. Марчук Г.И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М.: Наука, 1992. 425 с.
13. Penenko V.V. Some aspects of mathematical modeling using the models together with observational data // Bull. NCC: Num. Model in Atmosph. 1996. N 4. P. 31–52.
14. Penenko V., Baklanov A., Tsvetova E. Methods of sensitivity theory and inverse modeling for estimation of source parameters // FGCS. 2002. V. 18. P. 661–671.
15. Пененко В.В., Цветова Е.А. Подготовка данных для экологических исследований с использованием Reanalysis // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 463–465.
16. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
17. Бородулин А.И., Сафатов А.С., Белан Б.Д., Панченко М.В. О статистике концентрации тропосферного биоаэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 519–522.
18. Бородулин А.И., Майстренко Г.А., Чалдин Б.М. Статистическое описание процесса турбулентной диффузии аэрозолей в атмосфере. Метод и приложения. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. 124 с.

**A.I. Borodulin, A.S. Safatov, B.D. Belan, M.V. Panchenko, V.V. Penenko, E.A. Tsvetova. The vertical profiles of bioaerosol concentration in the troposphere of Southwestern Siberia**

The vertical profiles of the concentrations of aerosols of total protein and culturable microorganisms are presented. The results were obtained using the procedure of averaging of the data array on the concentration of atmospheric bioaerosols collected by the airplane probing of the troposphere of Southwestern Siberia in 1999–2003. It is shown that the vertical profiles of bioaerosol concentration present a unique footprints of the state of the atmosphere of the northern hemisphere, which reflect the information about the sources of bioaerosols and the processes of their transformation in the atmosphere.