

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 511.510.3

АТМОСФЕРНЫЕ АЭРОЗОЛИ НАД ЛЕСНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ СРЕДНЕЙ СИБИРИ¹

© 2013 г. А.В. Панов*, И. Хайнтценберг**, В. Бирмили**,
Р. Отто**, С. Чи***, М. Андреа***

* Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН

** Институт тропосферных исследований им. Лейбница, Лейпциг, Германия

*** Институт химии им. М. Планка, Майнц, Германия

Поступила в редакцию 07.02.2012 г.

Приведены результаты мониторинга аэрозольных характеристик атмосферы над лесными экосистемами Средней Сибири на базе обсерватории “ZOTTO”. Определены количественные и качественные характеристики атмосферных аэрозолей, показана их пространственно-временная изменчивость и источники происхождения. Оценено влияние пожарных эмиссий на продуцируемую аэрозольную компоненту. Показаны особенности циркуляции воздушных масс в районе исследований и представлена оценка вероятного влияния различных регионов на аэрозольный состав атмосферы.

Введение. Получение достоверных данных о характеристиках аэрозолей, закономерностях в процессах их образования и переноса в фоновых природно-климатических условиях является необходимым условием верификации существующих климатических моделей [1, 5].

Среднетаежная подзона Приенисейской Сибири наиболее удалена от крупных промышленных центров. В данном регионе климатическая роль аэрозолей атмосферы определяется исключительно естественными биосферными циклами, а влияние антропогенных факторов сравнительно невелико и обусловлено, главным образом, процессами мезомасштабного переноса аэрозолей из промышленных районов [1, 5, 6, 11]. Однако существующая система мониторинга атмосферных аэрозолей в Сибири охватывает в основном территории ее западной и восточной частей, тогда как для Средней Сибири аэрозольная компонента до настоящего времени остается малоизученной [5, 6].

Четырехлетний мониторинг атмосферных аэрозолей, осуществляемый на базе созданной в 2006 г. международной обсерватории “ZOTTO”,

в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири, позволил провести интегральную оценку их характеристик, определить вероятные источники происхождения и выявить закономерности переноса. Представленные результаты в значительной мере дополняют существующие представления об аэрозольном составе атмосферы, формируемом в фоновых природно-климатических условиях среднетаежной подзоны Сибири и бореальной зоны Евразии в целом.

Материалы и методы. Район исследований расположен в среднетаежной зоне Сибири в районе пос. Зотино (60 с.ш. 90 в.д.) Туруханского района Красноярского края. Тип климата – континентальный, с суровой и снежной зимой и прохладным, влажным летом. Рельеф территории представлен чередованием уплощенных холмов, валов и грив. Геоморфология, литология и климат способствуют значительной заболоченности, составляющей около 60% территории. Структура растительного покрова в районе исследований определяется мозаикой лесоболотных биогеоценозов, приуроченных к различным элементам ландшафта [2, 3].

Измерительная мачта (304 м), лаборатория и газоаналитический комплекс для проведения мониторинга атмосферных составляющих были установлены в период с 2004 по 2006 г. Высота мачты позволяет исследовать относительно од-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке международного проекта МНТЦ № 2757 и проекта Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-исследовательской деятельности.

нородную часть атмосферы – пограничный слой, что дает возможность интегральной оценки парниковых газов и аэрозолей, как формируемых биогеоценозами в зоне охвата мачты ($\sim 1000 \text{ км}^2$), так и приносимых в район исследований в результате дальнего атмосферного переноса. Подробная информация по обсерватории и комплексу установленного газоаналитического оборудования представлена на электронном ресурсе (www.zottoproject.org), а также в работах [12, 14]. На обсерватории с 2006 г. проводится оперативный мониторинг широкого спектра приземных концентраций парниковых газов (CO_2 , CH_4 , CO , O_3 , NO_x), физико-химических характеристик аэрозолей атмосферы и с 2008 г. метеорологических показателей.

Для исследования аэрозолей поток атмосферного воздуха (40 л/мин) поступал в лабораторию по трубопроводам от двух воздухозаборников, расположенных на высотах 50 и 300 м. Концентрация аэрозолей измерялась анализатором дифференциальной подвижности частиц, посредством конденсационного счетчика TSI 3760A (TSI Inc., США). Измерения коэффициентов поглощения света атмосферными аэрозолями проводились посредством абсорбционного фотометра (PSAP) (Radiance Research., США). Измерения концентрации угарного газа в атмосфере осуществлялись с помощью CO анализатора (Aerolaser) (Aerolaser GmbH., Германия). Подробное описание экспериментальной установки представлено в работах [8, 11]. Метеорологические параметры были взяты с метеостанции в п. Ворогово (WMO #23973) с координатами $61^\circ 00'$ с.ш. $89^\circ 45'$ в.д., расположенной на высоте 49 м над уровнем моря, в 40 км к северу от обсерватории и находящейся с ней в однородных природно-климатических условиях. Информация об оптической толщине дымового аэрозоля и сульфатов в районе исследований представлена лабораторией NRL Monterey.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием математического пакета OriginPro 8. Обратные 144-часовые 3D траектории переноса воздушных масс рассчитывались для набора данных по аэрозольным характеристикам за четырехлетний период наблюдений (2006–2009 гг.) с использованием PC версии HYSPLIT – траекторной модели, предоставленной лабораторией ARL NOAA [10]. Расчет траекторий производился из набора метеорологических полей GDAS, имеющих 3-часовой период измерений, пространственное разрешение порядка 1° и профиль уровней давления (1000, 925, 850 гПа и т.д.).

Алгоритм кластерного анализа траекторий базировался, главным образом, на подходе Дорлинга [9] с использованием метода k -средних. В общей сложности было проведено около 3000 кластерных итераций, в результате которых получено 10 кластеров 144-часовых обратных траекторий переноса воздушных масс в район обсерватории.

Результаты и обсуждение. Установлено, что за четырехлетний период наблюдений (2006–2009 гг.) микрофизические показатели аэрозолей, как интегральные, так и сезонные, демонстрируют более высокие значения на высоте 50 м (табл. 1). Среднее отношение счетной концентрации аэрозолей на высоте 50 м к их содержанию на уровне 300 м (N_{50}/N_{300}) составляет 1.3, а отношение

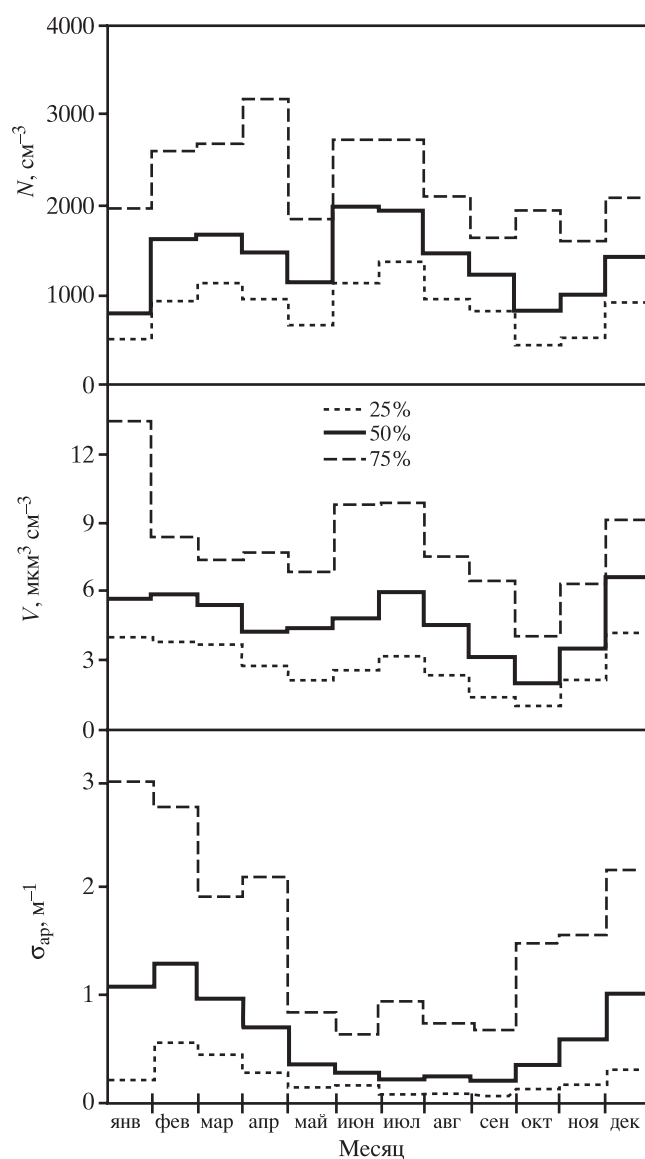


Рис. 1. Сезонный ход счетной (N , см^{-3}), объемной концентрации аэрозолей (V , $\mu\text{м}^3 \text{ см}^{-3}$), и коэффициенты поглощения при $I = 570 \text{ нм}$ ($\sigma_{\text{ар}}$, м^{-1}). Квантили (25, 50 и 75%).

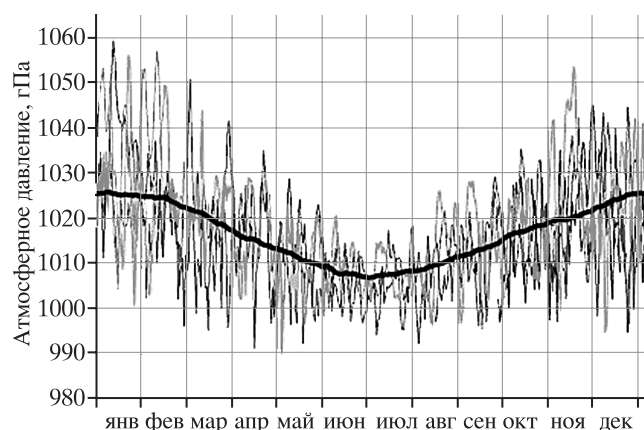


Рис. 2. Основные метеорологические параметры в районе исследований.

объемных концентраций (V_{50}/V_{300}) равно 1.0. Данный факт может свидетельствовать о том, что на 50 м оцениваются аэрозоли, формируемые, главным образом, приземными источниками, а 300-метровый уровень частично отражает их мезомасштабный перенос. Это также говорит о том, что в районе исследований имеются перманентные источники аэрозолей в атмосфере.

Годовой ход концентрации аэрозолей демонстрирует сравнительно невысокие концентрации в осенний период, более высокое их содержание зимой и два максимума в весенний и летний периоды (рис. 1).

Так, в зимне-весенний период (декабрь–март) изменение температурной стратификации атмосферы способствует нарастанию приземной концентрации аэрозолей, обусловленной, главным образом, их локальным транспортом из близле-

жащих населенных пунктов (п. Зотино, п. Ворогово и др.) в период отопительного сезона. Минимальные температуры в районе исследований держатся в период с декабря до середины февраля (рис. 2), на время которого приходится пик отопительного сезона.

Это подтверждают как увеличенные концентрации СО в атмосфере (рис. 3), так и повышенные значения объемной концентрации аэрозолей и коэффициенты поглощения света аэрозольными примесями (σ_{ap}) (рис. 1), наблюдаемые в этот период и свидетельствующие о высоком содержании в атмосфере крупнодисперсных фракций аэрозолей, а именно частиц сажи.

Также возможен региональный перенос загрязненного воздуха из промышленных центров. Если при развитой конвекции летом влияние промышленных центров простирается на десятки километров и не отражается на атмосферном составе в районе станции, то в условиях устойчивой стратификации в зимний период зона влияния промышленных центров распространяется на многие сотни километров и обсерватория может попадать в зону влияния таких загрязнений регионального масштаба.

Значительные всплески счетной концентрации аэрозолей в апреле (рис. 4б, в), варьирующие по величине за годы наблюдений, но формирующие стабильно повышенный среднегодовой уровень в этом месяце (рис. 1), обусловлены явлением арктической дымки. Данное явление возникает в результате дальнего переноса аэрозолей из промышленных районов Евразии в Арктику, их скоплением там, связанным с особенностями циркуляции атмосферы над Арктикой в зимний

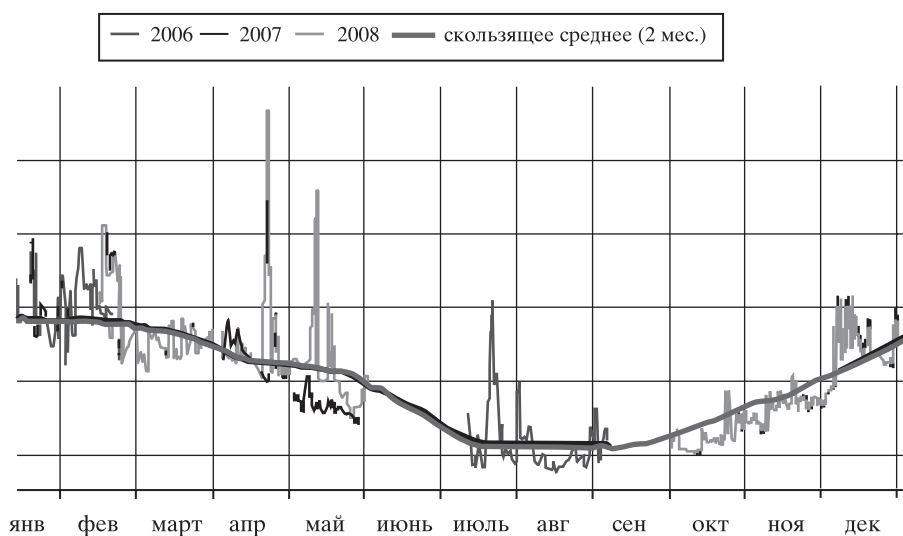


Рис. 3. Сезонный ход концентрации СО в атмосфере.

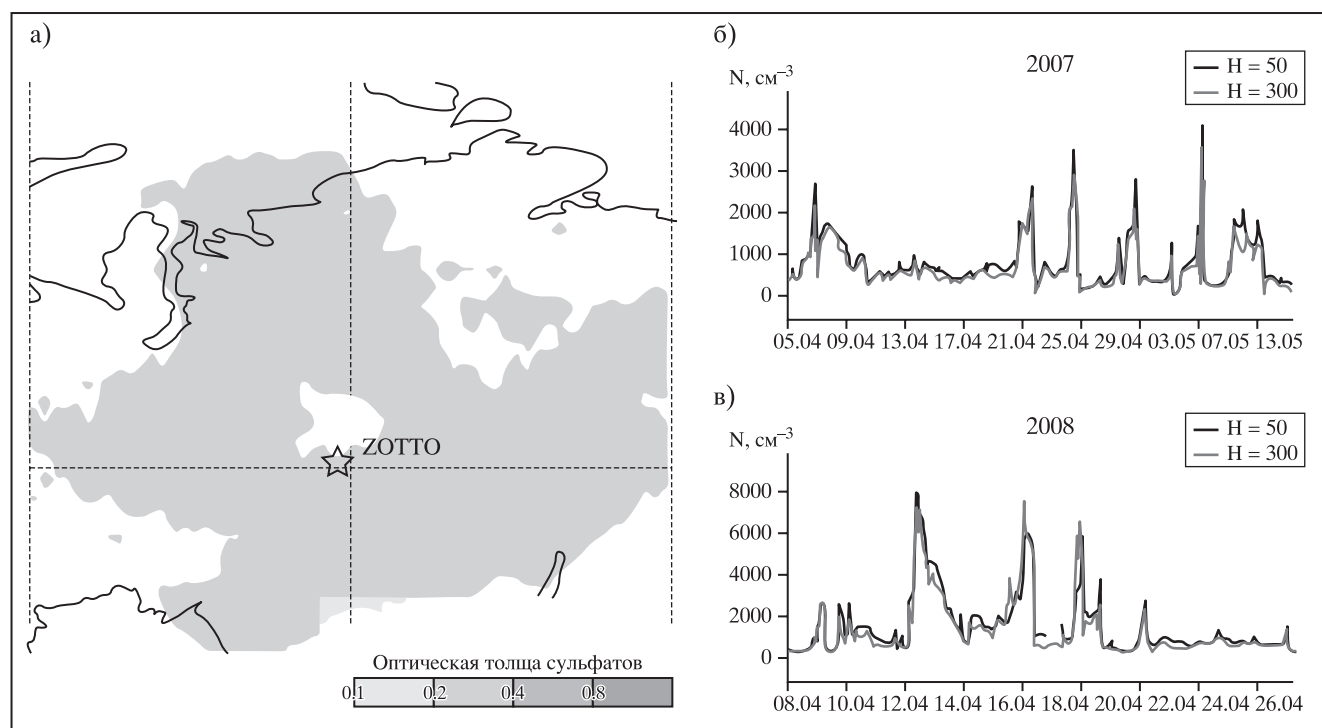


Рис. 4. Распространение и оптическая толща сульфатных аэрозолей в районе обсерватории (а) и повышения концентраций аэрозолей в 2007 г. (б) и 2008 г. (в) в период возникновения арктической дымки.

период, и дальнейшим переносом в весеннее время в районы умеренных широт [7]. Так, в районе исследований приход аэрозолей с Арктики наблюдается поздней весной, а именно в апреле-начале мая. При этом данные по концентрации сульфатных соединений в атмосфере (рис. 4а) и более сглаженный весенний пик объемной концентрации аэрозолей (рис. 1) свидетельствуют о том, что представлены они в значительной мере мелкодисперсными фракциями сульфатных аэрозолей.

Спад концентрации аэрозолей в мае можно объяснить минимальным влиянием антропогенных источников и температурных инверсий, в то время как температура воздуха сравнительно невелика (рис. 2) и подстилающая поверхность еще не достаточно прогрета для формирования природных аэрозолей.

В летне-осенний период значительная часть аэрозолей, как правило, имеет природное происхождение [5, 6, 11]. Одним из мощных источников грубодисперсных аэрозолей естественного происхождения является почвенная эрозия, при которой образование почвенно-эрозионных частиц происходит в результате пыления под действием ветра легко эродируемых почв, таких как песчаные почвы, распространенных в районе исследований. Не менее важным природным источником

аэрозолей летом служат процессы формирования растительным покровом вторичных аэрозольных частиц за счет окисления летучих органических соединений [1, 13]. При этом преобладание слабоподвижных малоградиентных барических образований способствует накоплению приземного аэрозоля.

Вместе с тем значительный вклад в содержание аэрозолей вносят и газо-аэрозольные эмиссии, возникающие при лесных пожарах. Ежегодно, в течение значительного периода времени, начиная с конца весны и вплоть до поздней осени, в Сибири на огромных площадях возникают лесные пожары, которые выбрасывают в атмосферу большие массы аэрозолей и химически активных газов. При этом формируемый в зоне масштабных лесных пожаров активный вертикальный тепломассоперенос может заметно влиять на атмосферную циркуляцию синоптического масштаба [4].

Так, в ходе исследований, в июле 2007 г. наблюдались масштабные лесные пожары в районе обсерватории, дымовой шлейф от которых распространялся на расстояние многих сотен километров, вплоть до Обской губы в северном направлении и Ханты-Мансийского АО на западе (рис. 5), а высота дымовой колонки могла достигать нескольких километров.

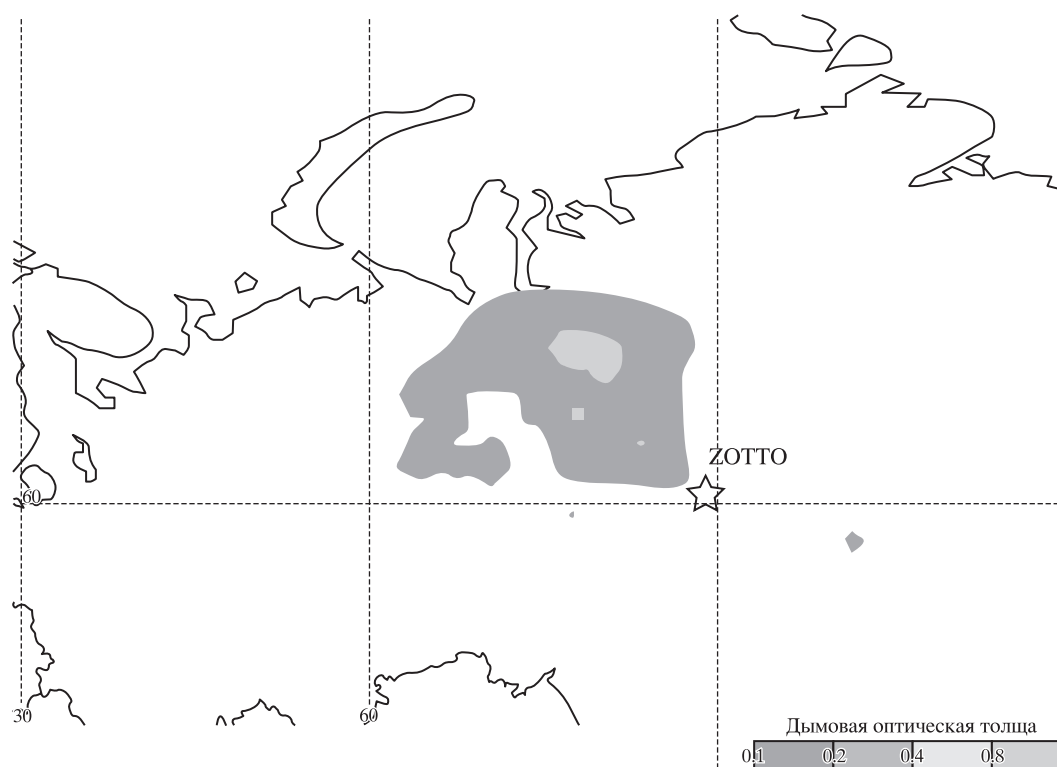


Рис. 5. Распространение и оптическая толща дымового шлейфа в районе обсерватории ZOTTO при лесных пожарах в июле 2007 г.

Помимо значительного роста концентрации СО в атмосфере (рис. 6б) было отмечено резкое возрастание концентрации аэрозолей (рис. 6а), представленных крупнодисперсными частицами сажи, о чем свидетельствуют повышенные значения σ_{ap} в июле (75% квантиль) (рис. 1).

В климатических условиях района исследований такие частицы дымового аэрозоля, выделяемого в зоне горения, способствуют кристаллизации облачной влаги и блокируют процессы осадкообразования. Возникающие нисходящие токи на больших территориях подавляют конвективный обмен и могут привести к смене типа тропосферной циркуляции. В результате формируется механизм положительной обратной связи, приводящий к увеличению длительности массовых пожаров [4]. Это особенно актуально для района исследований, где до 40% территории представлено сосняками лишайниковыми, относимыми к первому классу природной пожарной опасности.

Таким образом, оперативный мониторинг качественных характеристик аэрозолей в сочетании с сопряженными измерениями газовых примесей, проводимых на базе обсерватории "ZOTTO", а также мозаика биогеоценозов в зоне охвата мачты (~1000 км²), репрезентативная для значи-

тельной территории Средней Сибири, позволяют выявлять влияние лесных пожаров на физико-химический состав и конвекционные процессы в атмосфере.

В осенние месяцы общее снижение уровня аэрозолей в атмосфере исследуемого региона обусловлено большим по сравнению с другими сезонами количеством дней с туманами и обложными осадками. Относительная влажность воздуха здесь достигает максимальных значений (около 80% в октябре) (рис. 2). Это способствует очищению атмосферы и снижает роль подстилающей поверхности в формировании аэрозолей [11].

Наряду с синоптическими флуктуациями долговременный мониторинг аэрозольных характеристик и проведенный кластерный анализ обратных траекторий [9, 10] позволили изучить процессы регионального (континентального) переноса воздушных масс в район исследований и сопряженные с ним изменения аэрозольного состава атмосферы.

Так, установлено, что воздушные массы, как правило, приходят в район обсерватории с западного и северного направлений в результате западных ветров, характерных для средних широт. Часть аэрозолей приходит в район обсерватории

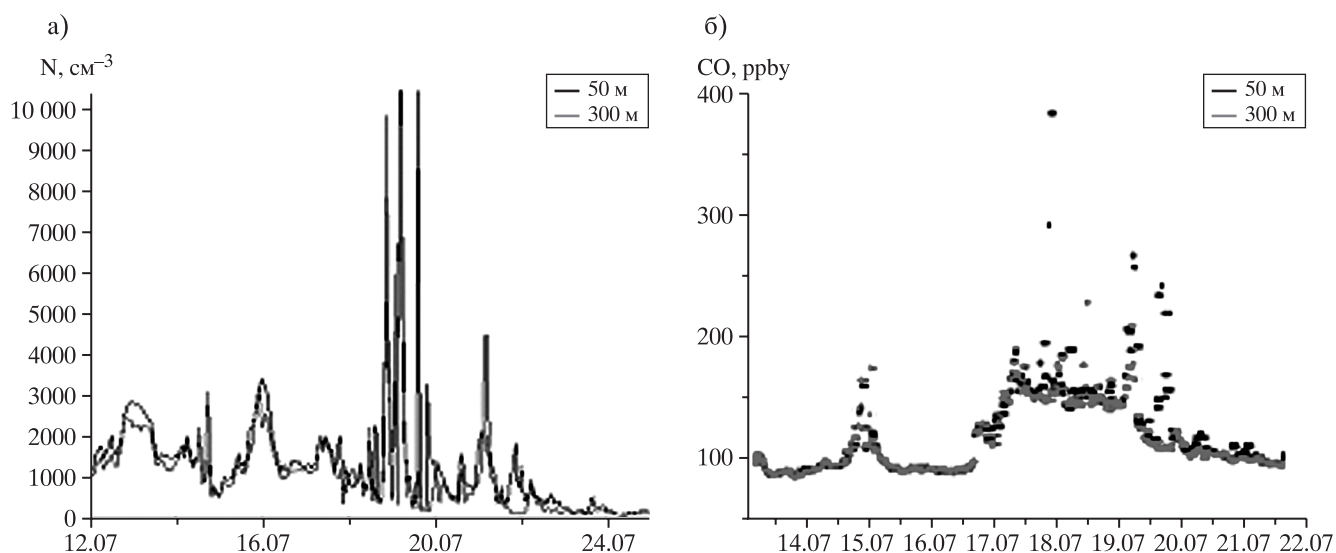


Рис. 6. Увеличение концентраций аэрозолей (а) и СО (б) наблюдаемое в районе исследований при лесных пожарах в июле 2007 г.

с морским умеренным воздухом Северной Атлантики (кластер 2), с территорий Северной и Центральной Европы (кластеры 3 и 4), и с континентальными тропическими воздушными массами, приходящими со стороны южных регионов Европейской территории России (кластеры 5, 6) (рис. 7, табл. 2). Также район исследований нередко оказывается под воздействием морского арктического воздуха, приходящего с акваторий Баренцева и Карского морей (акватория Северного Ледовитого океана) (кластер 1), а также континентального арктического воздуха, формирующегося над полуостровами Ямал и Таймыр (кластеры 8–10).

Низкие концентрации аэрозолей ($430\text{--}450\text{ см}^{-3}$), отмеченные в районе обсерватории, характерны для морского арктического воздуха, переносимого с акватории Северного Ледовитого океана и континентального арктического воздуха прибрежных территорий (п-ов Таймыр, п-ов Ямал) – кластеры 1, 9 и 10. Средние концент-

рации ($600\text{--}810\text{ см}^{-3}$) типичны для траекторий, приходящих в район наблюдений с западных направлений и охватывающих обширную территорию, простирающуюся от Северной Атлантики до Центральной Азии – кластеры 2, 3, 4, 6 и 7, а также воздушных масс, приходящих летом с прибрежной территории Северного Ледовитого океана (район п-ова Таймыр) – кластер 8. Повышенные концентрации (1220 см^{-3}) характерны для воздушных масс, переносимых летом со стороны южных районов Европейской территории России и проходящих через республику Казахстан (кластер 5), где значительные территории заняты эрозивно нарушенными пахотными землями.

Максимальная частота встречаемости, порядка 20% (табл. 2), характерна для воздушных масс, формирующихся в летний период на прибрежной территории Северного Ледовитого океана в районе п-ова Таймыр (кластер 8). Поступление воздушных масс с акватории Северного Ледовитого океана, Северной Атлантики и Центральной

Таблица 1. Счетная ($N, \text{см}^{-3}$) и объемная ($V, \text{мкм}^3/\text{см}^{-3}$) концентрации атмосферных аэрозолей на профиле высот

		Годовые значения			Май–Август			Ноябрь–Февраль		
Параметр	Квантиль	50 м	300 м	50/300	50 м	300 м	50/300	50 м	300 м	50/300
$N, \text{см}^{-3}$	25%	970	750	1.3	1040	890	1.2	860	630	1.4
	50%	1650	1290	1.3	1630	1390	1.2	1490	1190	1.3
	75%	2650	2140	1.2	2390	2110	1.2	2600	2070	1.3
$V, \text{мкм}^3/\text{см}^{-3}$	25%	2.8	2.3	1.2	3.0	2.5	1.2	3.4	2.8	1.2
	50%	5.0	5.0	1.0	5.1	4.7	1.1	5.4	4.8	1.1
	75%	8.7	8.7	1.0	8.9	7.9	1.1	9.8	8.3	1.2

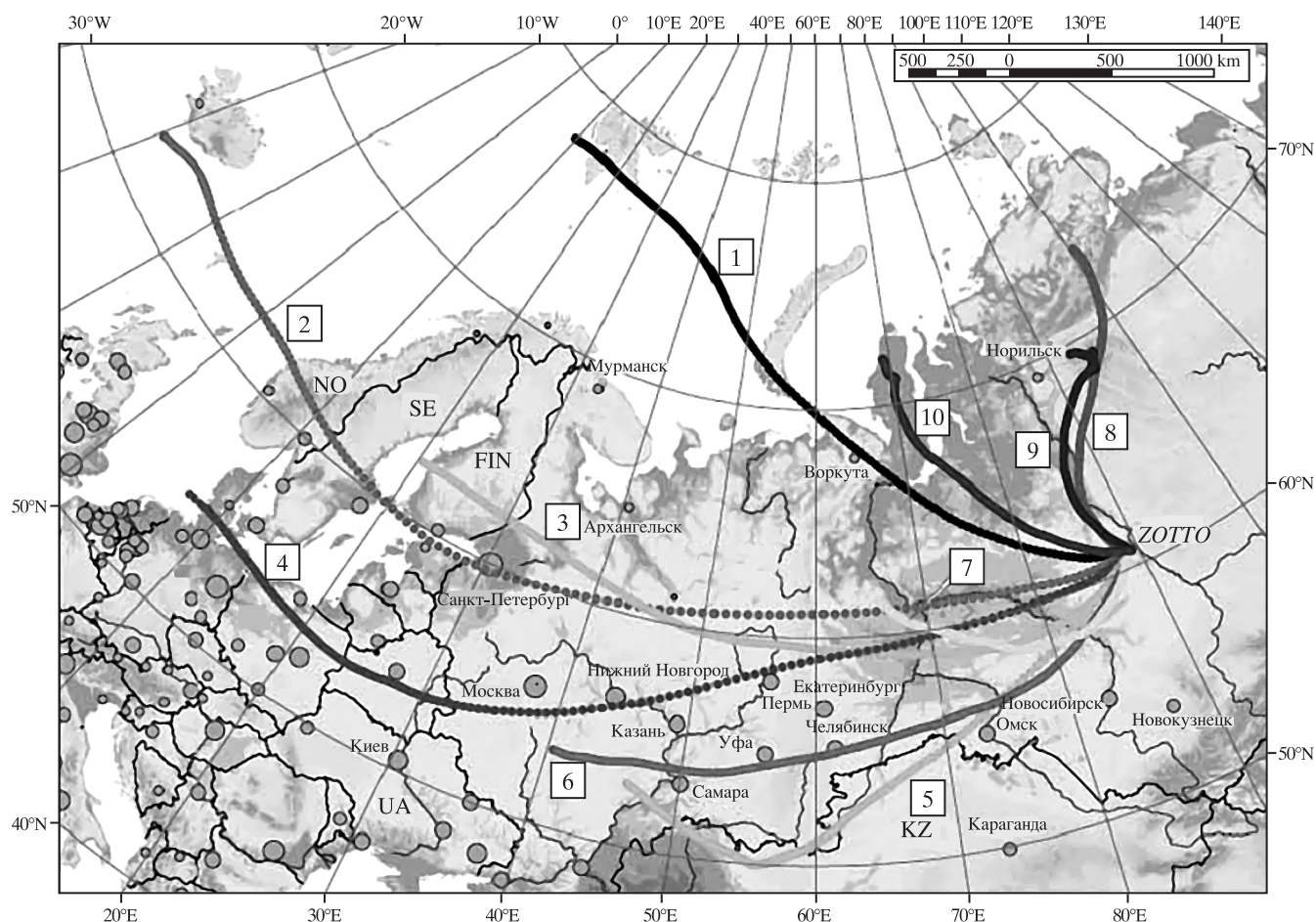


Рис. 7. 144-х часовые обратные траектории переноса воздушных масс в район обсерватории (номера кластеров указаны в квадратах).

Таблица 2. Характеристика кластеров обратных траекторий переноса воздушных масс в район обсерватории

№	Описание кластера		Частота встречаемости кластера, %	N, см ⁻³
	Географическое происхождение	Сезон переноса		
1	Северный Ледовитый океан	Зима	15	440
2	Северная Атлантика	Круглогодично	7	730
3	Северная Европа	Круглогодично	12	710
4	Центральная Европа	Круглогодично	4	770
5	Южные районы ЕТР	Лето	9	1220
6	Южные районы ЕТР	Зима	6	810
7	Центральная Сибирь	Лето	14	730
8	Северная часть Средней Сибири	Лето	20	600
9	Северная часть Средней Сибири	Зима	5	430
10	Северный Ледовитый океан	Лето	7	450

Сибири (кластеры 1, 3 и 7) характерно более чем для 40% дней за весь 4-х летний период наблюдений. Повторность прихода воздушных масс из Центральной Европы и п-ова Таймыр в зимнее время (кластеры 4 и 9) составляет не более 5% для каждого из кластеров.

Выводы. Таким образом, мониторинг, проводимый на базе обсерватории “ZOTTO”, дает возможность определения количественных и качественных характеристик аэрозолей, диагностики их источников происхождения, в том числе для оперативной диагностики пожарных эмиссий, и

вероятной оценки влияния различных регионов на аэрозольный состав атмосферы. Дальнейшая геохимическая характеристика аэрозольного состава позволит верифицировать источники происхождения аэрозолей в районе исследований.

Статистический анализ обратных траекторий переноса воздушных масс за четыре года наблюдений наглядно демонстрирует, что измерения аэрозолей на базе обсерватории являются репрезентативными для территории Западной и Центральной Сибири, а в определенных условиях дают возможность частичной оценки процессов дальнего атмосферного переноса для всей западной части Евразии, ограничиваясь 100° восточной долготы.

Установлено, что низкие концентрации аэрозолей характерны для воздушных масс с акватории Северного Ледовитого океана и его прибрежных территорий, средние типичны для траекторий, идущих с западных направлений и охватывающих территорию от Северной Атлантики до Центральной Азии, а повышенные концентрации приносятся в летний период с воздушными массами, идущими со стороны южных районов Европейской территории России, и проходящими через Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аэрозоли Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 548 с.
2. Белов А.В. Растительность Западной Сибири и ее картографирование. М.: Наука, 1984. 121 с.
3. Глебов Ф.З. Болота и заболоченные леса лесной зоны Енисейского левобережья. М.: Наука, 1969. 132 с.
4. Дубровская О.А., Мальбахов В.М., Шлычков В.А. Влияние массовых лесных пожаров на циклонические процессы в Сибири // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № 2. С. 58–66.
5. Куценогий К.П. Мониторинг атмосферных аэрозолей Сибири // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 704–711.
6. Куценогий К.П., Куценогий П.К. Аэрозоли Сибири. Итоги семилетних исследований // Сибирский экол. журн. 2000. Т. VII. № 1. С. 11–20.
7. Barrie L.A. Features of Polar regions relevant to tropospheric ozone chemistry // The tropospheric chemistry of ozone in the Polar regions. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 1993. P. 3–25.
8. Birmili W. et al. Particle penetration through a 300 m inlet pipe for sampling atmospheric aerosols from a tall meteorological tower // Aerosol Sci. Technol. 2007. № 41. P. 811–817.
9. Dorling S.R. et al. Cluster analysis: a technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry – method and applications // Atmos. Environ. 1992. V. 26A. P. 2575–2581.
10. Draxler R. and Hess G. An overview of the HYSPLIT 4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition // Aust. Meteor. Mag. 1998. V. 47. P. 295–308.
11. Heintzenberg J. et al. The atmospheric aerosol over Siberia, as seen from the 300 meter ZOTTO tower // Tellus. 2008. V. 60B. P. 276–285.
12. Kozlova E.A. et al. Seasonal, synoptic, and diurnal-scale variability of biogeochemical trace gases and O₂ from a 300-m tall tower in central Siberia // Global Biochem. Cycles. 2008. № 22. 16 p.
13. Kulmala M. et al. Formation and growth rates of ultra-fine atmospheric particles: a review of observations // J. Aerosol Sci. 2004. № 35. P. 143–176.
14. Winderlich J. et al. Continuous low-maintenance CO₂/CH₄/H₂O measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia // Atmos. Meas. Tech. 2010. № 3. P. 1113–1128.

Atmospheric Aerosols Over the Forest ecosystems of Central Siberia

A.V. Panov*, J. Heintzenberg**, W. Birmili**, R. Otto**, H. Chi***, M. Andreae***

*V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk

**Institute for Tropospheric Research, Leipzig, Germany

***Max Planck Institute for Chemistry, Mainz, Germany

The results of four years of atmospheric aerosol monitoring over Central Siberian forest ecosystems at the international observatory “ZOTTO” (www.zottoproject.org) are presented. The quantitative and qualitative aerosol characteristics as well as the temporal and spatial variability were shown, and possible sources of origin detected. The impact of fire emissions on aerosol component was estimated. The features of air mass circulation in study area were shown and possible impact of different regions on atmospheric aerosols was presented.