

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА БИОАЭРОЗОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ ВБЛИЗИ КРУШНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЦЕНТРА С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ*

К.Г. Шварц, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*
Ю.А. Шварц, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*
В.А. Шкляев, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*
С.Ю. Баландина, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*
В.В. Семериков, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*

Представлены основные результаты исследования распространения микромицетов от природного источника в нижнем слое атмосферы в окрестностях города Перми с учетом воздействия температурной неоднородности и влажности подстилающей поверхности. На рассматриваемой площадке 40×50 км выявлено пять типов шероховатости поверхности. На основе отбора проб в Камской долине было обнаружено в течение 2014 года 15 родов плесневых грибов, многие виды которых известны как патогены растений. *Cladosporium*, наивысшая концентрация спор которого выявлена в летний период, в процентном соотношении превосходит другие грибы. На основе локально-равновесного подхода выводятся уравнения математической модели путем усреднения поперек слоя исходных трехмерных уравнений скорости, теплопроводности и влажности воздуха, описывающих мезомасштабные атмосферные процессы, а также переноса живой примеси. Оценивается возможность создания систем локального мониторинга биоаэрозолей на основе разработанной модели. Определяются необходимые исходные метеорологические и микробиологические элементы и параметры задачи. Представлены результаты численных расчетов переноса спор микромицетов от точечного источника в районе Камской долины города Перми с учетом и без учета ее размножения с помощью метода сеток, пространственный шаг сетки 200 м. Расчеты проведены для различных погодных условий. В зимний период биоаэрозоль по своим характеристикам подобна пассивной примеси. В летний период температурная неоднородность подстилающей поверхности формирует местное локальное движение воздуха, влияющее на направление ветра и увеличивающее его скорость. Учет размножения микромицетов существенно увеличивает их максимальную концентрацию в нижнем слое атмосферы.

Ключевые слова: биоаэрозоли, моделирование, пограничный слой атмосферы, метеорологические параметры, двумерная модель, численное решение.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-01-96001).

Необходимость исследования переноса биоаэрозолей от природных источников в окрестности крупного промышленного города обусловлено тем, что их постоянное присутствие в атмосфере оказывает влияние на различные компоненты биогеоценозов, а также на здоровье человека. Для некоторых биогенных компонентов атмосферных аэрозолей хотя и установлены регламентирующие предельно допустимые концентрации этих веществ в атмосфере, но не разработано подходов к комплексной оценке опасности, представляемой микроорганизмами и микозами, находящимися в атмосферном аэрозоле, для населения региона. В этом случае важное место отводится разработке и созданию систем мониторинга различного уровня [1, 2].

При моделировании переноса спор различных микозов, учитывая их несколько большие размеры и меньшее время нахождения во взвешенном состоянии, необходимо решать задачу локального переноса, который происходит в пределах пограничного слоя атмосферы (ПСА). Исследование возможных траекторий перемещения биоаэрозолей на локальном уровне позволит установить районы их поступления в атмосферный воздух с целью нахождения источников и должно выполняться с учетом преобладающего направления и скорости переноса. Существующие в настоящее время математические модели распространения биоаэрозолей [3–6] слабо или вообще не учитывают влияние метеорологических усло-

вий на жизнедеятельность микроорганизмов, входящих в состав биоаэрозолей при их переносе.

Общий план работ на весь срок выполнения проекта состоял в определении значений исходных параметров и граничных условий задачи, оценке функциональных зависимостей жизнедеятельности биоаэрозолей от температуры и влажности воздуха; выводе математической модели для случая регионального переноса биоаэрозолей от природных источников с учетом их реакции на разнообразные погодные условия; разработке и тестировании вычислительных схем, проверке работоспособности модели на известных результатах (с привлечением данных лаборатории «Бактерицид» ПГНИУ); проведении расчетов характера распространения и состава биоаэрозолей с учетом различных типов погодных условий и разработке рекомендаций по анализу состава плесневых грибов в атмосфере и профилактических мер по улучшению качества окружающей среды и здоровья населения.

При оценке локального воздействия биоаэрозолей в окрестностях г. Перми и с учетом возможных направлений переноса, выбранный расчетный район, используемый для определения исходных данных, представлял собой прямоугольник размером 50×40 км (рис. 1, 2) [7]. Было выделено пять типов подстилающей поверхности: город; река и озеро; болото; лес; поле, мелкий кустарник (см. рис. 2). Температурные и влажностные различия оценивались с учетом микроклиматиче-



Рис. 1. Территория, используемая при моделировании переноса биоаэрозолей

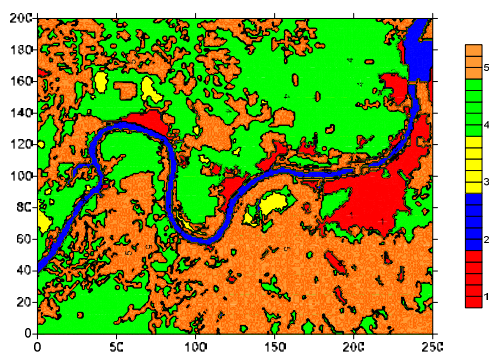


Рис. 2. Типы подстилающей поверхности на сетке 200×250 узлов

ских особенностей поверхности по сравнению с фоновым значением, как это было сделано в [8]. Различия зависели от погодных условий и выбирались в соответствии с [9, 10]. Характеристики метеопараметров и типов поверхности для двух классов устойчивости атмосферы приведены в табл. 1. При определении коэффициентов тепло- и влагоотдачи использовались универсальные функции [10].

Отбор проб атмосферного воздуха проводили аспирационным методом, с помощью автоматического пробоотборника воздуха марки ПУ-1Б, на селективную питательную среду Чапека-Докса, Сабуро на территории Краевого перинатального центра в городе Перми, расположенного в районе Камской долины, в трех стационарных точках на высоте 1,5 м (приземный слой воздуха), разной удаленности относительно входа в приемное отделение: 5–6 м, 25–30 м, 30–40 м. Пробы отбирались в разных погодных условиях в течение 2014 года. Культивирование посевов проводили в термостате при температуре $25 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 14 суток. Выросшие колонии определяли с использованием современных микробиологических определителей методом микроскопирования и идентификацией до рода и вида. Все эксперименты проводили в трехкратной повторности. Полученные статистические данные обработаны с помощью пакета статистиче-

ских программ «Statistika 6.0». Данные наблюдений отражены в табл. 2 [11–13].

Анализ показал, что концентрация спор плесневых грибов в атмосферном воздухе зависит от времени года, средней температуры, относительной влажности, направления и интенсивности ветра и других микроклиматических особенностей на конкретной географической местности. При этом плесневые грибы, выделенные из атмосферного воздуха, могут быть небезопасными в выявлении аллергических реакций у восприимчивых лиц, являясь микоаллергенами. Обнаружение и доминирование конкретных плесневых грибов в ходе проводимого микробиологического динамического слежения за циркуляцией микологических агентов в воздушной среде медицинских организаций может рассматриваться как индикатор эпидемиологического неблагополучия. В течение года вблизи больничного стационара было выявлено 15 родов плесневых грибов. Наиболее часто встречались *Cladosporium*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Botrytis* и *Fusarium*. Многие виды этого рода известны как патогены растений. Лидирующим микромицетом стал *Cladosporium*, наивысшая концентрация спор которого выявлена в летний период.

Вывод двумерной модели переноса биоаэрозолей с учетом неоднородности температуры и влажности основан на ме-

Таблица 1

Динамические и термические особенности различных типов подстилающей поверхности при равновесных условиях и сильной неустойчивости атмосферы

Тип поверхности	№ п/п	Температура поверхности, °С	Уровень шероховатости, М	Разность температуры в метровом слое, °С	Парциальное давление у поверхности, гПа
равновесные условия 11.12.2013 г.					
Город	1	-12,8	0,5	1,4	2,00
Река, озеро	2	-14,2	0,00001	0	1,94
Болото	3	-14,2	0,001	0	1,94
Лес	4	-13,1	0,5	1,1	1,98
Поле, мелкий кустарник	5	-14,2	0,00005	0	1,94
сильная неустойчивость 3.07.2014 г.					
Город	1	26	0,5	-0,5	12,30
Река, озеро	2	23,2	0,001	-3,3	14,25
Болото	3	22,2	0,005	-4,3	14,20
Лес	4	20,1	0,5	-6,4	12,25
Поле, мелкий кустарник	5	26,5	0,06	0	13,27

Таблица 2

Данные микробиологического динамического слежения по результатам исследований проб атмосферного воздуха (средние данные КОЕ/м³)

Микромицеты (основные роды)	Количество микромицетов в сезонные периоды, *КОЕ/м ³			
	зима	весна	лето	осень
<i>Cladosporium</i> sp.	7,0±3,5	165,0±16,4	235,0±45,0	115,0±7,1
<i>Penicillium</i> sp.	6,7±1,3	67,0±18	18,0±3,7	22,0±3,5
<i>Botrytis</i> sp.	0	32,0±1,5	29,0±13	27,0±9,7
<i>Alternaria</i> sp.	8,0±3,1	33,0±6,4	15,5±3,2	8,0±3,9
<i>Aspergillus</i> sp.	3,7±0,99	3,0±1,35	1,3±0,67	0
<i>Fusarium</i> sp.	0	6,7±3,5	17,0±3,3	0
<i>Mucor</i> sp.	1,3±0,67	3,7±2	0	0
Другие микромицеты	4,1±1,09	6,0±1,8	4,0±3,2	63,0±4,33
Общее количество микромицетов	30,0±5,2	315,0±28,0	320,0±35,0	228,0±7,0

Примечание: *КОЕ – колониобразующая единица.

тодике, изложенной в [8, 14, 15]. В качестве исходных используется система трехмерных уравнений движения, неразрывности, притока тепла, переноса массовой доли водяного пара и биоаэрозоля. Начальные условия включают скорость и направление геострофического ветра, температуру и влажность поверхности. Эти характеристики выбирались для конкретных погодных условий. Нижняя граница твердая, на ней задан поток тепла, влажности, пропорциональный температуре и влажности подстилающей поверхности, рассчитанный по разработанной методике. Задавался поток примеси от нестационарного источника. В силу того, что мы рассматриваем мезомасштабные процессы, длительность которых не превышает 12 часов, в качестве закона размножения для точечного источника примеси выбираем простейший закон экспоненциального роста биологической примеси [16].

Верхняя граница свободная. Скорость геострофического ветра над пограничным слоем атмосферы и его направление, высота пограничного слоя D считаются известными величинами. Ветер также может задаваться в виде среднего поперек слоя поля скорости. Использовалось общепринятое для подобных задач предположение, что взаимодействие между мезометеорологическими процессами внутри области решения и вне ее отсутствуют [17].

Уравнения модели с начальными и граничными условиями представлены в [18]. Рассматриваемая площадка включа-

ла окрестности города Краснокамска, северную и центральную часть города Перми (см. рис. 1). Использовались данные наблюдений, представленные в [13], моделировалось распространение в нижнем слое атмосферы спор микромицетов *Cladosporium* sp. от точечного источника вблизи Пермского краевого перинатального центра (Камская долина) в зимний (11.12.2013 г.) и летний (3.07.2014 г.) периоды. Параметр Кориолиса на данной широте $l = 1,24$ 1/с.

В зимний период высота пограничного слоя атмосферы составляла $D = 300$ м. Значения коэффициентов турбулентной диффузии принимались по горизонтали $A_M = A_T = A_q = A_c = 200$ м²/с [14, 19], по вертикали – $k_M = k_T = k_q = k_c = 5,58$ м²/с. Скорость юго-западного ветра на верхней границе пограничного слоя составляла 4 м/с; направление 270°; температура воздуха колебалась от -12,8 до -14,2°С, массовое содержание водяного пара изменялось незначительно, от 1,94 до 2 гПа (см. табл. 1), коэффициенты теплообмена, влагоотдачи и массопередачи для каждого типа поверхности имели значения $\gamma_1 = 2,413 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹, $\gamma_2 = 0,373 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹, $\gamma_3 = 0,487 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹, $\gamma_4 = 2,413 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹, $\gamma_5 = 0,393 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹. Микромицеты при такой температуре и влажности не размножаются ($k = 0$), поэтому биоаэрозоль распространялась в атмосфере как пассивная примесь.

В летний период высота слоя составляла $D = 1000$ м. Значение коэффициента турбулентной диффузии принималось по

горизонталь $500 \text{ м}^2/\text{с}$, по вертикали – $k_M = k_T = k_q = k_c = 62 \text{ м}^2/\text{с}$. Скорость юго-западного ветра на верхней границе пограничного слоя по данным радиозондирования составляла 2 м/с ; направление 225° ; температура воздуха колебалась от $20,1$ до $26,5^\circ\text{C}$, массовое содержание водяного пара изменялось от $12,25$ до $14,25 \text{ гПа}$. Коэффициенты $\gamma_1 = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, $\gamma_2 = 0,109 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, $\gamma_3 = 0,032 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, $\gamma_4 = 0,959 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, $\gamma_5 = 0,274 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$.

Расчеты проводились с помощью явной конечно-разностной схемы [8, 20, 21] на сетке 200×250 узлов. Слабая температурная неоднородность и влажность подстилающей поверхности практически не влияла на направление ветра в зимний

период. Максимальная концентрация примеси находилась над источником и составляла $7,6 \text{ КОЕ/м}^3$ (рис. 3, а).

Расчеты показали, что в летний период температурная неоднородность, а также в меньшей степени и неоднородность влажности подстилающей поверхности (рис. 4, а, 4, б) приводит к возникновению локальных вихрей в нижнем слое атмосферы (рис. 4, в, 4, з), которые корректируют направление распространения примеси от наземного источника. Наибольшие горизонтальные градиенты температуры находятся на границе раздела водной поверхности в районе источника примеси в Камской долине, где скорость ветра достигает своего максимального значения

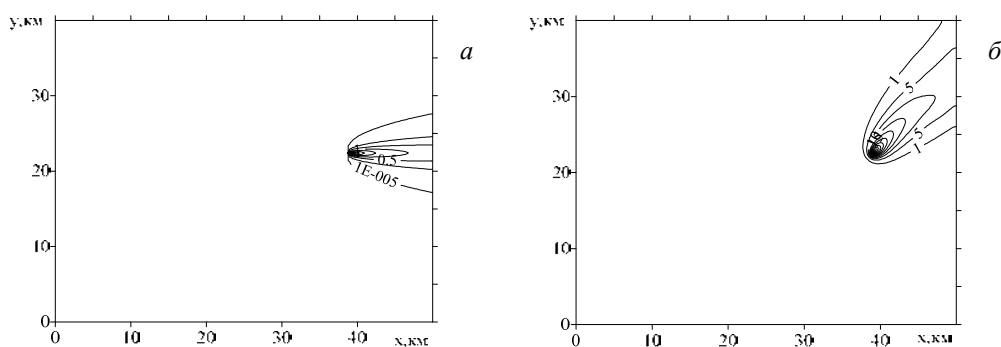


Рис. 3. Поле концентрации примеси от точечного источника: а – зимой, б – летом

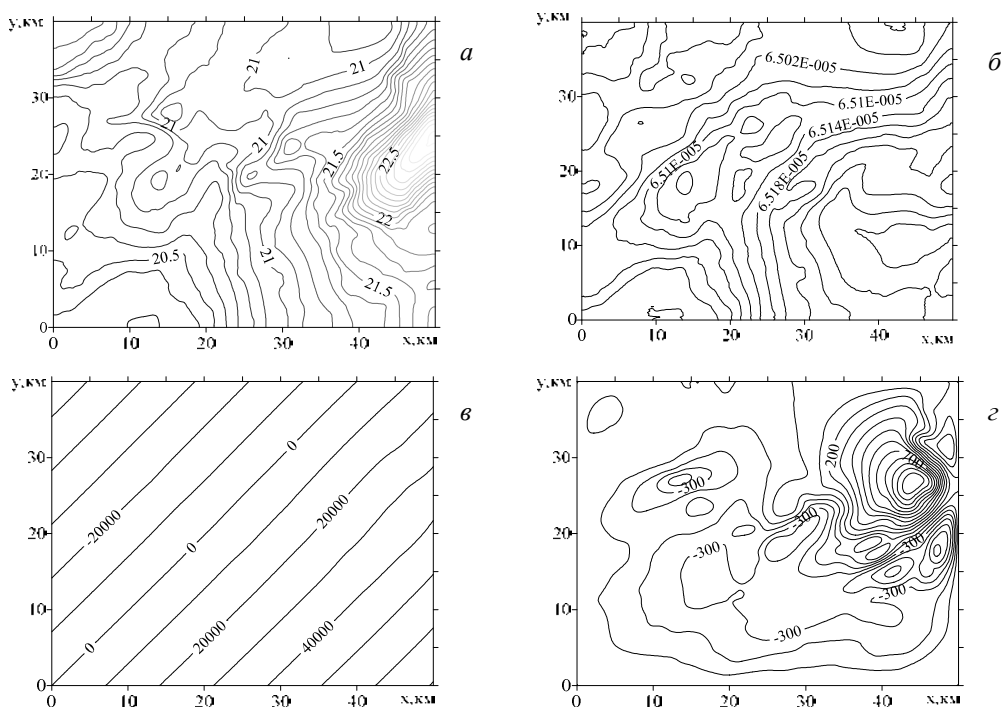


Рис. 4. Изотермы средней поперек слоя температуры в $^\circ\text{C}$ (а), изолинии средних поперек слоя влажности в гПа (б), функции тока в $\text{м}^2/\text{с}$ (в) и возмущений функции тока в $\text{м}^2/\text{с}$ (з) летом

2,46 м/с, что на 23% выше наблюдаемой скорости ветра. Под действием ветра направление распространения примеси слегка отклоняется от 225° вправо. Без учета размножения ($k = 0$) максимальная концентрация средней поперек слоя примеси достигает 99,8 КОЕ/м³. С учетом наблюде-

ний [13], проводимых в течении 2013–2014 годов, параметр $k = 0,908 \cdot 10^{-7}$ 1/с. В этом случае максимальная концентрация средней поперек слоя примеси равна 138,5 КОЕ/м³ (рис. 3, б), что более чем на 38% выше концентрации, рассчитанной без учета размножения спор.

Библиографический список

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 атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13. – № 6-7. – С. 639–644.
2. Бородулин А.И., Сафатов А.С., Белан Б.Д., Панченко М.В., Пененко В.В., Цветова Е.А. Высотные профили концентраций биоаэрозолей в тропосфере юга Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18. – № 8. – С. 694–698.
3. Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories – a review and bibliography // Atmos. Environ. – 1998. – Vol. 32. – № 6. – P. 447–466.
4. Пененко В.В., Цветова Е.А. Моделирование процессов переноса примесей в прямых и обратных задачах климатоэкологического мониторинга и прогнозирования // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Т. 12. – № 6. – С. 482–488.
5. Пененко В.В., Цветова Е.А. Некоторые аспекты решения взаимосвязанных задач экологии и климата // ПМТФ. – 2000. – Т. 41. – № 5. – С. 161–170.
6. Penenko V., Baklanov A., Tsvetova E. Methods of sensitivity theory and inverse modelling for estimation of source parameters // FGCS. – 2002. – Vol. 18. – P. 661–671. DOI: 10.1007/978-1-4020-5877-6_2.
7. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Методические подходы к созданию системы локального расчетного мониторинга атмосферных биоаэрозолей // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края: сб. науч. тр. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2013. – Вып. 6. – С. 56–60.
8. Шварц К.Г., Шварц Ю.А., Шкляев В.А. Двумерная модель мезомасштабных процессов в нижнем слое атмосферы с учетом неоднородности температуры и влажности воздуха // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 5–15. <http://dx.doi.org/10.7242/1999-6691/2015.8.1.1>.
9. Романова Е.Н., Мосолова Г.И., Береснева И.А. Микроклиматология и ее значение для сельского хозяйства. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 244с.
10. Шкляев В.А., Ермакова Л.Н., Шкляева Л.С. Исследование микроклимата города с целью оценки биометеорологических показателей селитебной территории // Геогр. вест. – 2010. – № 3(14). – С. 52–59.
11. Семериков В.В., Четина О.А., Баландина С.Ю., Шварц К.Г. О биоразнообразии плесневых грибов техногенно-измененных почв на территории Пермского края // Геогр. вест. – 2013. – № 4(27). – С. 79–81.
12. Баландина С.Ю., Семериков В.В., Шварц К.Г. Реализация микробиологического мониторинга за концентрацией спор плесневых грибов в атмосферном воздухе // Medicus. – 2015. – № 4(4). – С. 43–46.
13. Баландина С.Ю., Семериков В.В., Шварц К.Г. Изучение сезонной динамики содержания микромицетов в атмосферном воздухе около лечебного учреждения // Вест. Удмурт. ун-та. Сер. 6: Биология. Науки о Земле. – 2015. – Вып. 3(25). – С. 7–10.
14. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Математическое моделирование мезомасштабных и крупномасштабных процессов переноса примеси в бароклинной атмосфере. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. – 156 с.
15. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Моделирование процессов переноса примеси в свободной атмосфере с помощью квазитрехмерной модели // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 8. – С. 44–54.
16. Ризниченко Г.Ю. Математические модели в биофизике и экологии. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 184 с.
17. Аргучинцев В.К., Аргучинцева А.В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. – 255 с.
18. Шварц К.Г. Математическая модель переноса живых биоаэрозолей в нижнем слое атмосферы с учетом неоднородностей температуры и влажности // IX Всерос. науч. конф. «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и технологий» ЭКОМОД-2016 [Электронный ресурс]: Киров, 4–9 июля 2016 / Сб. материалов конф. // Под. ред. И.Г. Поспелова и А.В. Шатрова. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2016. – С. 63–66.
19. Алоян А.Е. Динамика и кинематика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере: курс лекций. – М.: ИВМ РАН, 2002. – 201 с.

20. Шатров А.В., Шварц К.Г. Численное моделирование атмосферных мезомасштабных процессов переноса примесей в окрестности города Кирова // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3. – № 3. – С. 117–125. <http://dx.doi.org/10.7242/1999-6691/2010.3.3.32>.
21. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Численное моделирование атмосферных мезомасштабных процессов переноса многокомпонентной примеси при торфяном пожаре // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2012. – Т. 5. – № 3. – С. 274–283. <http://dx.doi.org/10.7242/1999-6691/2012.5.3.32>.

**MATHEMATICAL MODELLING OF BIOAEROSOL TRANSFER
IN THE ATMOSPHERE NEAR A LARGE INDUSTRIAL CENTER TAKING
INTO ACCOUNT HETEROGENEITY OF TEMPERATURE AND HUMIDITY**

K.G. Shvarts, Y.A. Shvarts, V.A. Shklyayev, S.Y. Balandina, V.V. Semerikov

Perm State National Research University

The paper presents the main results of a study of the spread of micromycetes from a natural source in the lower atmosphere in the neighborhood of Perm under the influence of temperature inhomogeneity and humidity of the underlying surface. In the considered rectangular area of 40 by 50 km five types of surface roughness were identified. Based on sample collection in the area called Kamskaya Dolina in close proximity to the perinatal center in the laboratory of "Bactericide" (PGU) 15 genera of fungi were identified in 2014, many species of which are known as pathogens of plants. Cladosporium was found as the leader of micromycetes with the highest concentration of spores, which come out in the summer. On the basis of the local-equilibrium approach equations of the mathematical model are derived. They are derived by averaging across the layer of the initial three-dimensional equations of velocity, thermal conductivity and humidity, describing mesoscale atmospheric processes, as well as the equation of living impurity transfer. The possibility of establishing local monitoring systems of bioaerosols on the basis of the developed model is evaluated. The necessary basic meteorological and microbiological elements and parameters of the problem are determined. The results of numerical calculations of the propagation of spores from a point source near Kamskaya Dolina in Perm with and without consideration of its reproduction, taking into account the local air movements arising due to its temperature inhomogeneities, using a grid method are presented. The spatial grid spacing is 200 meters. The calculations were performed for a variety of weather conditions. In winter bioaerosol behaves like a passive impurity - a weak heterogeneity of the underlying surface covered with snow, almost no effect on the movement of air. In summer, the temperature heterogeneity of the underlying surface forms local motion of air, affecting the direction of wind and increasing its velocity. The account of the reproduction of mold significantly increases their maximum concentration in the lower layer of the atmosphere.

Keywords: bio-aerosols, modeling, atmospheric boundary layer, meteorological parameters, two-dimensional model, numerical solution.

Сведения об авторах

Шварц Константин Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и информатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: kosch@psu.ru

Шварц Юлия Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики, ПГНИУ; e-mail: jul-schwarz@psu.ru

Шкляев Владимир Александрович, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы, ПГНИУ; e-mail: shklyayev@psu.ru

Баландина Светлана Юрьевна, заведующая лабораторией «Бактерицид», ПГНИУ; e-mail: bactericid@yandex.ru

Семериков Владислав Васильевич, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник научно-исследовательской части, ПГНИУ; e-mail: vadislavsemerikov@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.