

УДК 504.3.054+551.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА БИОАЭРОЗОЛЕЙ В НИЖНЕМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

*К.Г. Шварц, Ю.А. Шварц, В.А. Шкляев, С.Ю. Баландина, В.В. Семериков*

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
г. Пермь, 614990, Россия*

### Аннотация

В статье описывается двумерная модель переноса биоаэрозолей от нестационарного источника примеси в пограничном слое атмосферы на локальном уровне (размеры изучаемой территории до 50 км) с учетом шероховатости, температурной неоднородности и влажности подстилающей поверхности. Уравнения модели выводятся путем усреднения поперек слоя исходных трехмерных уравнений скорости, теплопроводности, влажности воздуха, а также переноса живой примеси. Оценивается возможность создания систем локального мониторинга биоаэрозолей на основе разработанной модели. Численные расчеты выполнены с помощью сеточного метода, пространственный шаг сетки составляет 200 м. Численное моделирование переноса спор микромицетов осуществлялось с учетом и без учета их размножения, с учетом локального движения воздуха, возникающего из-за его температурной неоднородности. В зимний период биоаэрозоль по своим характеристикам подобна пассивной примеси. Слабая неоднородность подстилающей поверхности, покрытой снегом, практически не влияет на движение воздуха. В летний период температурная неоднородность подстилающей поверхности формирует местное локальное движение воздуха, влияющее на направление ветра и увеличивающее его скорость. Кроме того, в данный период происходит размножение микромицетов, что существенно увеличивает концентрацию биоаэрозолей в нижнем слое атмосферы.

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

### Введение

Необходимость исследования переноса биоаэрозолей от природных источников в окрестности крупных промышленных городов обусловлена тем, что их постоянное присутствие в атмосфере оказывает влияние на различные компоненты биогеоценозов, а также на здоровье человека. Для некоторых биогенных компонентов атмосферных аэрозолей установлены предельно допустимые концентрации, регламентирующие их содержание в атмосфере, но не разработано подходов к комплексной оценке опасности, представляемой микроорганизмами и микозами, находящимися в атмосферном аэрозоле, для населения региона. В связи с этим важное место отводится разработке и созданию систем мониторинга переноса биоаэрозолей различного уровня. Например, Институтом оптики атмосферы СО РАН (г. Томск) совместно с НИИ аэробиологии ГНЦ ВБ

«Вектор» (пос. Кольцово, Новосибирская обл.) проводятся регулярные наблюдения за тропосферным биоаэрозолем на юге Западной Сибири. Для этой цели отбираются пробы атмосферного воздуха с помощью самолета-лаборатории на высотах до 7 км [1]. Как было показано в [2], обратные траектории, построенные для района г. Новосибирска на высоте 1.5 км, летом начинались в Северной Америке, что указывало на трансграничный перенос биоаэрозолей. Это возможно в том случае, если размеры переносимых микроорганизмов составляли доли микрометров, тогда скорость их оседания не превосходит 1 мм/с и частицы биоаэрозоля могут рассматриваться по аналогии с газовой компонентой атмосферы.

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, в которых находятся источники их поступления в атмосферный воздух, и должно выполняться с учетом преобладающего направления и скорости переноса. При этом следует учитывать, что поступление спор микозов (на примере плесневых грибов) происходит в теплую половину года.

Существующие в настоящее время математические модели распространения биоаэрозолей (модели типа «рецептор – источник») используют три различных подхода.

Методы моделирования траекторий, основанные на лагранжевом подходе, хорошо описаны в [3]. Для того чтобы идентифицировать источник, воздействующий на исследуемый регион, необходимо рассчитать обратные траектории. Однако сама методология построения таких траекторий для решения задач переноса в турбулентной среде на дальние расстояния некорректна, так как траекторные методы чрезвычайно чувствительны к вариациям начальных условий. Если же траекторные методы используются при локальном переносе, этот недостаток несущественен.

Другой подход основан на моделях эйлерового типа, когда для всех узлов выбранной сетки определяются требуемые параметры: составляющие скорости ветра, концентрация примеси, температура и влажность воздуха и др.

Существуют также комбинированные алгоритмы прямого и обратного моделирования, основанные на вариационном принципе в сочетании с теорией чувствительности [4–6]. Они используются, например, для оценки источников воздействия при определении концентрации биоаэрозолей [2]. Но такие модели слабо или вообще не учитывают влияние метеорологических условий на жизнедеятельность микроорганизмов, входящих в состав биоаэрозолей при их переносе.

## 2. Исходные уравнения

При оценке локального воздействия биоаэрозолей на районы Закамска в г. Перми и с учетом возможных направлений переноса выбранная расчетная область, используемая для определения исходных данных, представляла собой прямоугольник размером 50×40 км с шагом 200 м, то есть сетка имела размеры 250×200 узлов, что несколько превышало первоначальный вариант [7]. Исследуемый район с жилой застройкой расположен в центре квадрата.

Система исходных уравнений включает уравнения движения, неразрывности, притока тепла. Преобразованная система уравнений была получена в [8, 9]. Дополнительно используются уравнения переноса массовой доли водяного пара и биоаэрозоля. Роль влажности воздуха при отсутствии биоаэрозолей рассмотрена ранее в [10]. Таким образом, исходная система уравнений гидротермодинамики во влажной атмосфере с учетом переноса биоаэрозолей во вращающейся трехмерной декартовой системе координат в нижнем слое атмосферы толщиной  $D$  имеет вид [11]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} + lv + A_M \Delta u + \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} - lu + A_M \Delta v + \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \beta \theta + A_M \Delta w + \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = A_T \Delta \theta + \frac{\partial}{\partial z} k_T \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = A_q \Delta q + \frac{\partial}{\partial z} k_q \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = A_c \Delta c + \frac{\partial}{\partial z} k_c \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (7)$$

где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  – оператор Лапласа.

Начальные условия включают скорость и направление геострофического ветра, температуру и влажность поверхности. Эти характеристики выбирались для конкретных погодных условий

$$u = -c_g \sin(dd), \quad v = -c_g \cos(dd), \quad \theta = \theta_s, \quad q = q_s \quad \text{при } t = 0. \quad (8)$$

Граничные условия задавались аналогично [10]

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad w = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = D, \quad (9)$$

$$u = v = w = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma_{Ti}(\theta - \theta_s), \quad \frac{\partial q}{\partial z} = \gamma_{qi}(q - q_s),$$

$$\frac{\partial c}{\partial z} = \gamma_{ci}c + f_c(t, \theta, q) \quad \text{при } z = 0. \quad (10)$$

Здесь  $t$  – время, ось  $Ox$  направлена на восток, ось  $Oy$  – на север, а ось  $Oz$  – вертикально вверх,  $\vec{v} = (u, v, w)$  – вектор скорости движения воздуха,  $\Phi = RT_{cp} p' / p$  – флуктуации геопотенциала;  $T_{cp}$  – средняя температура воздуха в слое;  $p'$  – флук-

туации атмосферного давления;  $\beta = g/\bar{\theta}$  – параметр плавучести;  $\bar{\theta}$  – средняя потенциальная температура окружающего воздуха;  $\theta = T(p_0/p)^{R/c_p}$  – потенциальная температура;  $q$  – массовое содержание водяного пара в воздухе;  $p$  – атмосферное давление (зависит лишь от высоты);  $p_0$  – атмосферное давление у поверхности земли;  $R$  – удельная газовая постоянная, входящая в уравнение состояния влажного воздуха  $p = \rho RT(1 + 0.61q)$ . Произведение  $T(1 + 0.61q)$  называют виртуальной температурой ( $T_v$ ). В этом случае можно считать, что относительные пульсации плотности выражаются через относительные пульсации виртуальной температуры  $\rho'/\rho \approx -T'_v/T_v$ . Подобным образом можно использовать потенциальную температуру. Остальные обозначения:  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;  $\theta_s$  и  $q_s$  – температура воздуха и массовое содержание водяного пара на уровне шероховатости подстилающей поверхности;  $l$  – параметр Кориолиса; для представления турбулентных потоков и напряжений используется концепция коэффициентов турбулентного обмена, когда  $A_M$ ,  $k_M$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости;  $A_T$ ,  $k_T$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной теплопроводности;  $A_q$ ,  $k_q$  – коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного переноса влаги;  $A_c$ ,  $k_c$  – коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного переноса биоаэрозолей. Все они меняются для различных погодных условий.  $\gamma_{Ti}$ ,  $\gamma_{qi}$  и  $\gamma_{ci}$  – коэффициенты тепло-, влагоотдачи и массопередачи примеси ( $i$  – номер типа шероховатой поверхности);  $c_g$  – скорость геострофического ветра на верхней свободной границе пограничного слоя атмосферы;  $dd$  – азимут геострофического ветра.

Функция  $f_c$  описывает источники спор микромицетов с учетом их размножения на подстилающей поверхности. Она является функцией времени, температуры и влажности, ее описание в природных условиях – это сложная, слабо изученная проблема [12, 13]. В своих исследованиях мы опираемся на результаты наблюдений, приведенных в работах [14, 15]. В силу того, что мы рассматриваем мезомасштабные процессы, длительность которых не превышает 12 ч для точечного источника примеси, в качестве закона размножения выбираем простейший закон экспоненциального роста биологической примеси [16] и тогда

$$f_c = f_0 e^{kt}, \quad (11)$$

где  $f_0$  – постоянный источник спор микромицетов на уровне шероховатости в начальный момент времени, параметр  $k$  характеризует скорость естественного увеличения популяции за счет размножения.

Скорость геострофического ветра  $c_g$  над пограничным слоем атмосферы и его направление, высота пограничного слоя  $D$  считаются известными величинами. Ветер также может задаваться в виде поля средней в пограничном слое

скорости с учетом его вертикального профиля. На свободных боковых границах предполагаем, что

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0, \quad (12)$$

где  $n$  – внешняя нормаль. Равенства (12) соответствуют предположению, что взаимодействия между мезометеорологическими процессами внутри области решения и вне её отсутствуют [17].

Граничные условия на нижней границе могут быть весьма разнообразными, учитывая многообразие типов подстилающей поверхности и ее неоднородность, причем их количественные характеристики будут меняться в зависимости от погодных условий и сезона года. С учетом особенностей выбранного района исследований [7] были заданы 5 типов поверхности (табл. 1). Уровень микрошероховатости каждого типа поверхности определялся в соответствии с литературными данными [18, 19]. Эти характеристики задавались для каждого узла сетки. Массовая доля водяного пара определялась по величине парциального давления.

Температурные и влажностные различия оценивались с учетом микроклиматических особенностей поверхности по сравнению с фоновым значением, как это было сделано в [10]. Различия зависели от погодных условий и выбирались в соответствии с [18, 20]. Характеристики метеопараметров и типов поверхности для двух классов устойчивости атмосферы приведены в табл. 1. При определении коэффициентов тепло- и влагоотдачи использовались универсальные функции. Подробно этот метод описан в [10].

Табл. 1

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

Тип поверхности	№	Температура поверхности, °С	Уровень шероховатости, м	Разность температуры в метровом слое, °С	Парциальное давление у поверхности, гПа
Равновесные условия 11 декабря 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 июня 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

Особо следует остановиться на температурной стратификации атмосферы. От этого параметра зависит интенсивность турбулентной диффузии, а также высота ПСА [19]. Важная роль при этом отводится инверсиям, включая приземные.

Наличие инверсий или их отсутствие определялось по профиломеру МТП-5, данные которого использовались ранее для оценки мощности, глубины и продолжительности инверсий [21].

### 3. Двумерная модель

Была выведена двумерная модель на основе локально-равновесного подхода [22–25] по методике, подробно описанной в работах [8–10]. Ограничиваемся рассмотрением мезомасштабных процессов, при которых

$$\delta = D/L \ll 1, \quad t \gg t_r, \quad (13)$$

где  $D$  – высота слоя,  $L$  – горизонтальный масштаб движения,  $t$  – характерное время равновесных состояний, а  $t_r$  – время релаксации воздушных течений к состоянию равновесия при изменении внешних условий.

Определим функцию  $Q = \theta(1 + 0.61q)$ , пропорциональную  $T_v$ . Введем безразмерную переменную  $\zeta = z/D$ , обозначим среднюю поперек слоя величину

$$\langle g \rangle = \int_0^1 g(t, x, y, \zeta) d\zeta. \quad \text{Двумерную модель получим из трехмерной путем усред-$$

нения поперек слоя трехмерной модели (1)–(6) с использованием граничных условий (9)–(11). Для замыкания системы необходимо выразить нелинейные слагаемые, а также значения на границах через средние поля скорости, температуры и влажности ( $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle \theta \rangle$ ,  $\langle q \rangle$ ,  $\langle c \rangle$ ). С этой целью воспользуемся точным решением исходной задачи, описывающим однородное по  $x, y$  течение. Оно находится для бесконечного горизонтального вращающегося слоя в предположении несжимаемости воздуха в нижнем слое атмосферы и линейности температуры и влажности подстилающей поверхности и имеет следующее представление:

$$M(\zeta) = f_1(\zeta)\langle M \rangle - 2f_2(\zeta)Q_1, \quad (14)$$

$$\theta = \langle \theta \rangle + O(Ek\delta^2), \quad (15)$$

$$q = \langle q \rangle + O(Ek\delta^2), \quad (16)$$

$$c = \langle c \rangle + \frac{D}{\gamma_{ci}D + \eta \text{th} \eta} f_0 \left[ \frac{\text{ch} \eta(\zeta - 1) - \text{th} \eta}{\text{ch} \eta} - \frac{\text{th} \eta}{\eta} \right] e^{kt}. \quad (17)$$

Здесь комплекснозначная функция скорости  $M(\zeta) = u(\zeta) + iv(\zeta)$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ,

$$f_1(\zeta) = \frac{1}{1 - \text{th}(\lambda)/\lambda} \left[ 1 - \frac{\text{ch} \lambda \zeta}{\text{ch} \lambda} \right],$$

$$f_2 = \left[ \frac{\text{th} \lambda}{\lambda} + \frac{1 - \text{ch} \lambda}{\lambda^2 \text{ch} \lambda} - \frac{1}{2} \right] f_1(\zeta) - \frac{\text{ch} \lambda \zeta}{\text{ch} \lambda} - \frac{\text{sh} \lambda(\zeta - 1)}{\lambda \text{ch} \lambda} + \zeta, \quad \langle M \rangle = \langle u \rangle + i\langle v \rangle,$$

$Q_1 = q_x + iq_y$ , параметр  $\lambda = \frac{1+i}{\sqrt{2Ek}}$ ,  $Ek = \frac{k_M}{lD^2}$  – число Экмана,

$$q_{x,y} = \mp \frac{\beta D}{2l} \partial_{yx} \langle Q \rangle, \quad \eta = \sqrt{\frac{k}{k_c}} D.$$

Полагая, что при выполнении условия мезомасштабности формулы (14)–(17) достаточно правильно (асимптотически верно по малому параметру  $\delta$ ) описывают структуру термически неоднородного и влажного потока мезомасштабных течений воздуха в каждой точке слоя в любой момент времени, используем их в качестве замыкающих соотношений. Определим вихрь скорости

$$\omega(t, x, y) = \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y}.$$

Учитывая бездивергентность средней поперек слоя скорости  $\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} = 0$ , введем функцию тока  $\psi(t, x, y)$ :  $\langle u \rangle = -\frac{\partial \psi}{\partial y}$ ,  $\langle v \rangle = \frac{\partial \psi}{\partial x}$ .

Выберем в качестве единиц измерения длины, скорости, времени, температуры, влажности и концентрации примеси соответственно  $L$  – длину площадки,  $c_g$ ,  $L/c_g$ ,  $\delta\theta$  и  $\delta q$  – максимальную разность температуры и влажности,  $\delta c$  – максимальную концентрацию (КОЕ/м<sup>3</sup>, КОЕ – колониеобразующие единицы) в сезонные периоды [12]. Тогда в терминах вихря скорости  $\omega$ , функции тока  $\psi$ , средней поперек слоя потенциальной температуры  $\theta(t, x, y)$  и влажности

$$q(t, x, y), \text{ а также приведенной к размерности функции тока } Q(t, x, y) = \frac{\beta D}{2l} \langle Q \rangle$$

и средней поперек слоя концентрации  $c(t, x, y)$ , уравнения модели для описания мезомасштабных процессов в нижнем слое атмосферы в безразмерном виде имеют следующее представление:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + k_1 \{\psi, \omega\} + k_3 Rt [\{Q, \omega\} + \{\psi, \Delta Q\}] - k_5 Rt^2 \{Q, \Delta Q\} = \frac{1}{Re} \Delta \omega - \mu (k_7 \omega - k_8 Rt \Delta Q), \quad (18)$$

$$\Delta \psi = \omega, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \{\psi, \theta\} = \frac{1}{Pe} \Delta \theta - q(\theta - \bar{\theta}_s), \quad (20)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \{\psi, q\} = \frac{1}{Pe_q} \Delta q - r(q - q_s), \quad (21)$$

$$Q = \theta(1 + 0.61q), \quad (22)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \{\psi, c\} = \frac{1}{Pe_c} \Delta c - r_c c + f_c e^{kt}, \quad (23)$$

где  $\{\psi, \omega\} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x}$  – якобиан,  $\mu = lc_g/L$  – безразмерный коэффициент

трения о подстилающую поверхность,  $Re = c_g L / A_M$  – число Рейнольдса,

$Rt = \beta D \delta Q / 2lc_g L$  – термическое число Россби,  $\delta Q = \delta[\theta(1 + 0.61q)]$  – максимальная

разность виртуальной температуры,  $\bar{q} = q_1 c_g / L$  – безразмерный коэффициент

выхолаживания, где  $q_1 = \gamma_i k_T / D$ ,  $r = r_i c_g / L$ , где  $r_1 = \gamma_{q_i} k_q / D$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ),

безразмерные функции  $\bar{\theta}_S = \theta_S / \delta\theta$ ,  $\bar{q}_S = q_S / \delta q$ ,  $r_c = r_2 c_g / L$ , где  $r_2 = \gamma_{ci} k_c / D$ ,  
 $\bar{f}_c = \left[ 1 - \frac{\gamma_{ci} D}{\gamma_{ci} D + \eta \text{th} \eta} \left( 1 - \frac{\text{th} \eta}{\eta} \right) \right] \frac{k_c f_0 c_g}{D \delta c L} \delta(x - x_1) \delta(y - y_1)$ ,  $(x_1, y_1)$  – безразмерные  
 координаты источника примеси,  $Pe = c_g L / A_T$  – число Пекле,  $Pe_q = c_g L / A_q$ ,  
 $Pe_c = c_g L / A_c$ . Безразмерный коэффициент  $\bar{k} = k c_g / L$ . Коэффициент  $k_1 = \Re \langle f_1 f_1 \rangle$   
 стоит перед слагаемым, описывающим перенос завихренности поперек слоя,  
 $k_3 = \Re \langle f_1 f_2 \rangle$  – перед слагаемыми, описывающими перенос завихренности «тер-  
 мическим ветром» и перенос завихренности «термического ветра»,  $k_5 = \Re \langle f_2 f_2 \rangle$   
 является множителем слагаемого, описывающего перенос «термическим ветром»  
 завихренности «термического ветра» [16],  $k_7 = \Re f_1'(1)$ ,  $k_8 = \Re f_2'(1)$  ( $\Re$  – дей-  
 ствительная часть числа), значение которых зависит от величины числа Экмана.  
 В нашем случае  $Ek = 0.5$  и ему соответствуют  $k_1 = 1.197$ ,  $k_3 = 0.003036$ ,  
 $k_5 = 0.002312$ ,  $k_7 = 3.0022$ ,  $k_8 = 0.01064$ .

Начальные условия:

$$\psi = y \sin(dd) - x \cos(dd), \quad \omega = 0, \quad \theta = \bar{\theta}_S, \quad q = \bar{q}_S, \quad c = \bar{f}_c / D \quad \text{при } t = 0. \quad (24)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0, \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0, \quad (25)$$

где  $n$  – внешняя нормаль.

Система (18)–(25) – это двумерная модель, которая описывает мезомасштабные процессы переноса живой примеси (споры микромицетов) из точечного источника в нижнем слое атмосферы с учетом температурной неоднородности, влажности и шероховатости подстилающей поверхности и является модификацией моделей [8–10].

#### 4. Численные расчеты

Расчеты проводились на основе системы уравнений (18)–(23) с начальными и граничными условиями (24)–(25). Рассматриваемая площадка размером  $40 \times 50$  км включала окрестности г. Краснокамска, северную и центральную часть г. Перми. Использовались данные наблюдений, представленные в [14], моделировалось распространение в нижнем слое атмосферы спор микромицетов *Cladosporium* sp. от точечного источника вблизи Пермского краевого перинатального центра (Камская долина) в зимний (11 декабря 2013 г.) и летний (3 июля 2014 г.) периоды. Исходя из результатов научных исследований НИЛ «Бактерицид» следует, что в г. Перми микромицеты рода *Cladosporium* по частоте встречаемости занимают одно из первых мест. На уровень контаминации оказывают влияние климатические особенности местности, в частности температура и влажность, а также тип почвы – главная среда обитания грибов в естественных условиях. Грибы рода *Cladosporium* являются обитателями практически всех органических поверхностей. Исходные данные по температуре и влажности подстилающей поверхности

представлены в табл. 1. Параметр Кориолиса на данной широте  $l = 1.24 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и при сравнительно небольших горизонтальных размерах рассматриваемой площадки считался постоянным.

В зимний период высота пограничного слоя атмосферы составляла  $D = 300 \text{ м}$ . Задавались различные значения коэффициента турбулентной диффузии: по горизонтали он принимался равным  $A_M = A_T = A_q = A_c = 200 \text{ м}^2/\text{с}$  [11, 22, 23], по вертикали —  $k_M = k_T = k_q = k_c = 5.58 \text{ м}^2/\text{с}$ . Скорость ветра на верхней границе пограничного слоя составляла  $4 \text{ м/с}$ ; направление  $270^\circ$ ; температура воздуха  $\theta_S$  колебалась от  $-12.8^\circ\text{C}$  до  $-14.2^\circ\text{C}$ . В зависимости от типа шероховатости подстилающей поверхности парциальное давление водяного пара изменялось незначительно от  $1.94$  до  $2 \text{ гПа}$  (см. табл. 1), коэффициенты теплообмена  $\gamma_{Ti}$ , влагоотдачи  $\gamma_{qi}$  и массопередачи  $\gamma_{ci}$  имели значения  $\gamma_1 = 2.413 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ,  $\gamma_2 = 0.373 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ,  $\gamma_3 = 0.487 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ,  $\gamma_4 = 2.413 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ,  $\gamma_5 = 0.393 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ . Микромицеты при такой температуре и влажности не размножаются ( $k = 0$ ), поэтому биоаэрозоль распространялась в атмосфере как пассивная примесь.

В летний период высота слоя составляла  $D = 1000 \text{ м}$ . Значение коэффициента турбулентной диффузии по горизонтали принималось равным  $500 \text{ м}^2/\text{с}$ , 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  $2 \text{ м/с}$ ; направление  $225^\circ$ ; температура воздуха  $\theta_S$  колебалась от  $20.1^\circ\text{C}$  до  $26.5^\circ\text{C}$ , а парциальное давление изменялось от  $12.25$  до  $14.25 \text{ гПа}$  (см. табл. 1). Коэффициенты теплообмена  $\gamma_{Ti}$ , влагоотдачи  $\gamma_{qi}$  и массопередачи  $\gamma_{ci}$  имели значения  $\gamma_1 = 1.28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ,  $\gamma_2 = 0.109 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ,  $\gamma_3 = 0.032 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ,  $\gamma_4 = 0.959 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ,  $\gamma_5 = 0.274 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ .

Расчеты проводились с помощью явной конечно-разностной схемы [8–10] на сетке  $200 \times 250$  узлов. Отыскивалось стационарное решение задачи. Слабая температурная неоднородность и влажность подстилающей поверхности практически не влияли на направление ветра.

Полученные численные результаты показали, что в летний период температурная неоднородность, а также в меньшей степени и неоднородность влажности подстилающей поверхности (рис. 1, а, б) приводит к возникновению локальных вихрей в нижнем слое атмосферы (рис. 2, а). Положительный вихрь в восточной части рассматриваемой области соответствует зоне наибольших контрастов температуры. Максимальные горизонтальные градиенты температуры находятся на границе раздела городской застройки и водной поверхности. Контрасты температуры в районе источника примеси в Камской долине приводят к усилению скорости ветра, которая достигает своего максимального значения  $2.5 \text{ м/с}$ , что на  $23\%$  выше наблюдаемой скорости ветра.

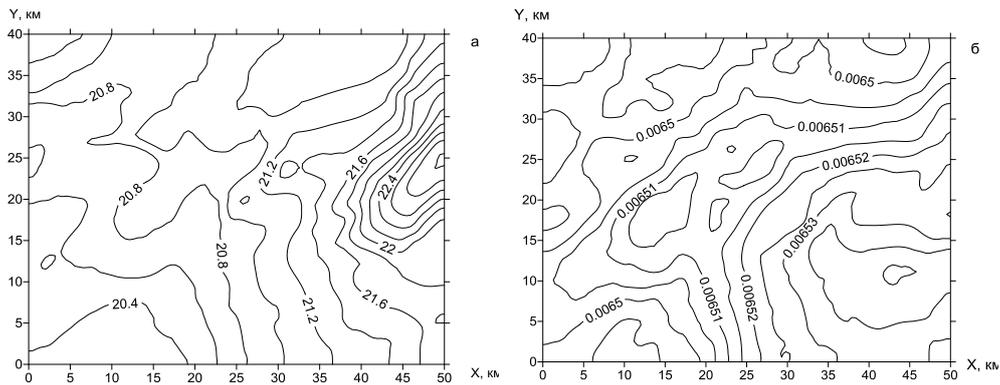


Рис. 1. Поле средней в слое температуры, °С (а) и массовой доли водяного пара, г/кг (б) летом

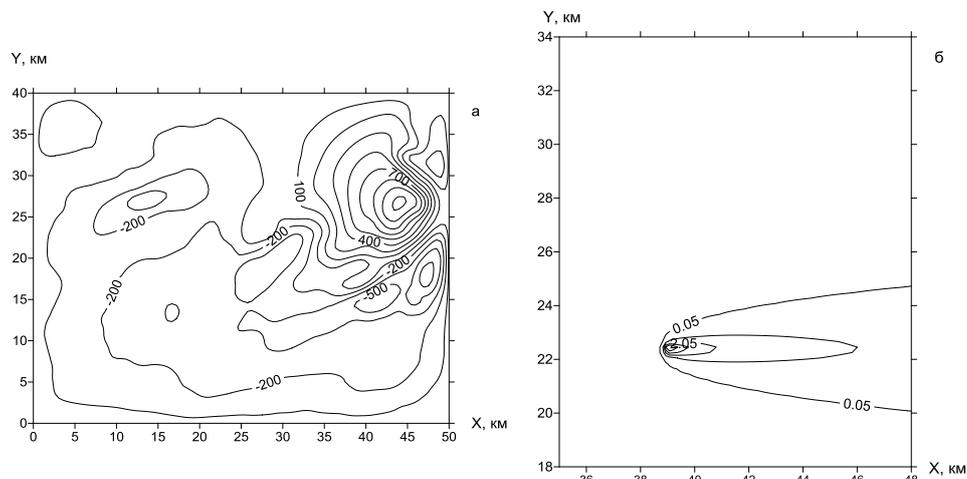


Рис. 2. Поле возмущений функции тока летом,  $\text{м}^2/\text{с}$  (а) и поле концентраций зимой (б),  $\text{КОЕ}/\text{м}^3$

Максимальная концентрация примеси в зимний период, когда размножение отсутствует, составляла  $7.6 \text{ КОЕ}/\text{м}^3$  над источником (рис. 2, б). В этот период времени температурная неоднородность поверхности незначительна, а поле влажности однородно и эти факторы не вносят искажений в траектории движения примеси.

Учитывая небольшое время перемещения биоаэрозоля над рассматриваемой территорией, влияние температурных условий и влагосодержания на скорость размножения микромицетов будет незначительным. Это позволяет рассматривать перемещение биоаэрозоля на начальном участке траектории как перенос пассивной примеси. В дальнейшем при расширении территории распространения примеси будет учитываться зависимость концентрации от погодных условий в соответствии с (11). Летом без учета размножения ( $k = 0$ ) максимальная концентрация средней в слое примеси достигает  $99.8 \text{ КОЕ}/\text{м}^3$ .

Локальные вихревые структуры, возникающие под влиянием температурной неоднородности, оказывают влияние на траекторию движения примеси. Первоначально была исследована зависимость направления перемещения аэрозоля

от контрастов температуры и влажности. В первую очередь эти изменения учитывались для летнего сезона, так как в это время вариации как температуры, так и влажности более существенны, чем зимой. Для этого расчеты концентрации выполнялись по следующей схеме: при фиксированном направлении ветра поля температуры и влажности считались однородными (вариант 1), затем температура поверхности изменялась, но изменения влажности не учитывались (вариант 2), далее, изменялась влажность, но температуры оставалась постоянной (вариант 3), и, наконец, учитывались изменения, как температуры, так и влажности (вариант 4). Для перечисленных 4 вариантов по полученным полям концентраций аэрозоля определялись их изменения в зависимости от неоднородности температуры и влажности. Первый вариант принимался в качестве исходного, а оставшиеся 3 рассчитывались как отклонения от него. Это позволило выявить особенности, вызванные только изменением температуры или влажности либо за счет изменения температуры и влажности.

Расчеты показали, что направление переноса аэрозоля изменяется под влиянием неоднородностей или температуры, или влажности (рис. 3). В нашем случае траектория переноса аэрозоля развернулась влево, о чем свидетельствуют поля изменений концентраций. Однако, учитывая, что изменения концентрации не превосходят 5%, поворот факела будет незначительным. Кроме этого, основные изменения в направлении переноса вносят вариации температуры (рис. 3, а), а роль вариаций влажности хотя и прослеживается, но оказывается не существенной (рис. 3, б).

В этом случае суммарное воздействие неоднородностей температуры и влажности (рис. 4, а) мало отличается от варианта, учитывающего только особенности поля температуры (рис. 3, а). Поле концентраций, рассчитанное при учете всех изменений температуры, влажности и ветра, представлено на рис. 4, б. С учетом результатов наблюдений [14], проводимых в течение 2013–2014 гг., значение параметра  $k$  составило  $0.908 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ . В этом случае максимальная концентрация примеси вблизи от источника составляет  $138.5 \text{ КОЕ/м}^3$  (рис. 4, б), что более чем на 38% выше концентрации, рассчитанной без учета размножения спор.

Анализ поля возмущений функции тока показывает, что восточная часть рассматриваемой области занята положительным вихревым возмущением, которое вызвано значительными контрастами температуры воздуха. Вихревая циркуляция приводит не только к левому развороту траектории перемещения аэрозоля, но и к искривлению самой траектории, о чем свидетельствует асимметричность изменений поля концентраций (рис. 4, а). Горизонтальные градиенты влажности выражены незначительно, что способствуют несущественному изменению направления движения примеси.

### Заключение

В работе построена новая математическая двумерная модель, описывающая турбулентные мезомасштабные процессы, сопровождающие движение воздуха в нижнем слое влажной атмосферы и перенос биоаэрозоля с учетом его размножения от источника на подстилающей поверхности на примере микромицетов *Cladosporium* sp.

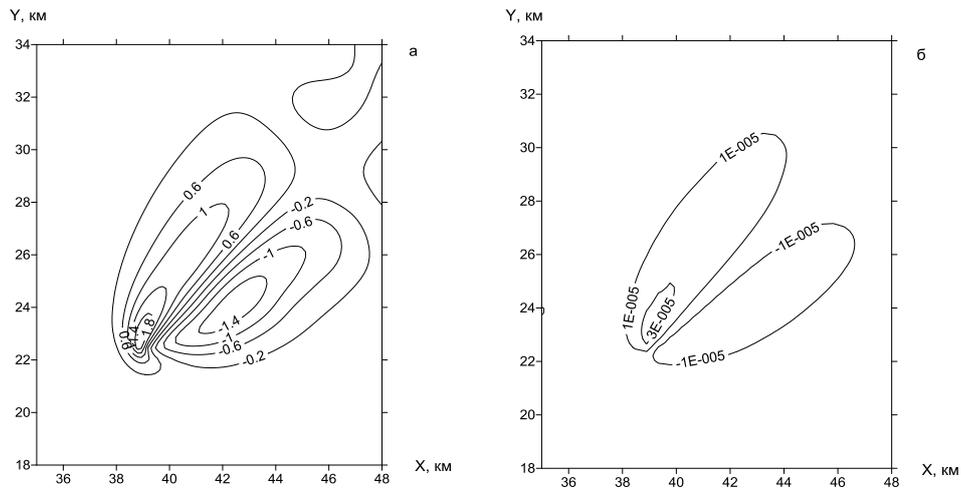


Рис. 3. Изменения концентрации аэрозоля ( $\Delta c$ ) под влиянием неоднородностей температуры (а) и влажности (б),  $\text{КОЕ}/\text{м}^3$

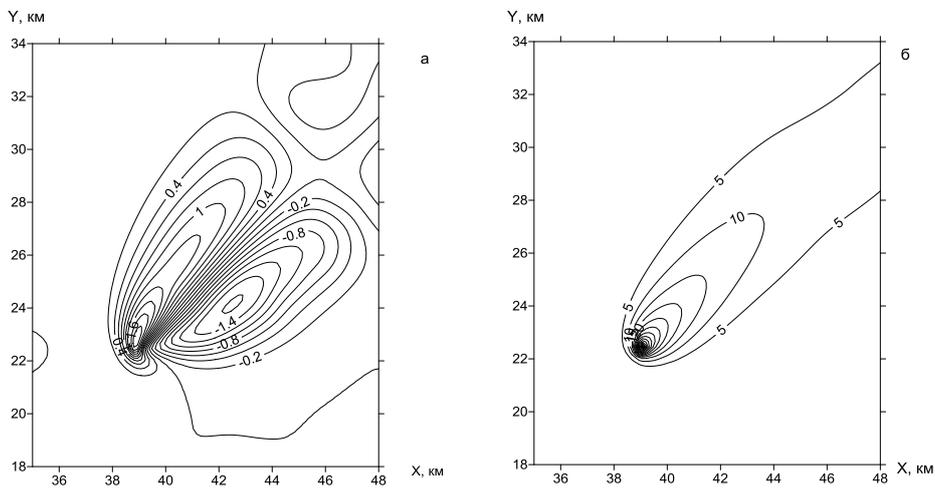


Рис. 4. Изменения концентрации аэрозоля ( $\Delta c$ ) под влиянием неоднородностей температуры и влажности (а) и поле концентраций с учетом температуры и влажности летом,  $\text{КОЕ}/\text{м}^3$

Показано, что при наличии неоднородности подстилающей поверхности при достаточно большом горизонтальном градиенте температуры, влажности и вертикальном тепловом потоке с нижней границы, возникает локальное вихревое движение воздуха, которое корректирует направление распространения примеси от наземного источника.

Выявлено, что изменение направления движения аэрозоля определяется в первую очередь неоднородностью поля температуры воздуха и в меньшей степени неоднородностью влажности.

В зимний период размножением микровицетов можно пренебречь. В это время года при достаточно однородных полях температуры и влажности перемещение биоаэрозоля происходит в соответствии с основным потоком без искажений.

Летом определение перемещения биоаэрозоля необходимо выполнять при обязательном учете неоднородностей температуры, влажности, а также скорости размножения микромицетов.

### Литература

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. – V. 32. No 6. – P. 947–966. – doi: 10.1016/S1352-2310(97)00457-3.
4. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Моделирование процессов переноса примесей в прямых и обратных задачах климатозоологического 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 // *Прикл. механика и техн. физика*. – 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 // *Future Gener. Comput. Syst.* – 2002. – V. 18, No 6. – 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. *Шатров А.В., Шварц К.Г.* Численное моделирование атмосферных мезомасштабных процессов переноса примесей в окрестности города Кирова // *Вычисл. механика сплошных сред*. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 117–125. – doi: 10.7242/1999-6691/2010.3.3.32.
9. *Шварц К.Г., Шкляев В.А.* Численное моделирование атмосферных мезомасштабных процессов переноса многокомпонентной примеси при торфяном пожаре // *Вычисл. механика сплошных сред*. – 2012. – Т. 5, № 3. – С. 274–283. – doi: 10.7242/1999-6691/2012.5.3.32.
10. *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. механика сплошных сред*. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 5–15. – doi: 10.7242/1999-6691/2015.8.1.1.
11. *Алоян А.Е.* Динамика и кинематика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. – М.: ИВМ РАН, 2002. – 201 с.
12. *Кривоногих К.Н., Четина О.А.* Термотолерантность и протеолитическая активность микромицетов больничной среды // *Междисциплинарные исследования: Сб. материалов науч.-практ. конф.* – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2013. – Т. 1. – С. 39–42.
13. *Четина О.А., Кирьянова И.Н., Баландина С.Ю., Крылова И.О.* Оценка патогенности и общей токсичности некоторых плесневых грибов жилых помещений города Перми // *Вестник молодых ученых ПГНИУ: Сб. науч. тр.: в 2 т. / Отв. ред. Е.Н. Батурин*. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2011. – Т. 1. – С. 214–223.

14. *Баландина С.Ю., Семериков В.В., Шварц К.Г.* Изучение сезонной динамики содержания микромицетов в атмосферном воздухе около лечебного учреждения // Вестн. Удм. ун-та. Сер. 6: Биология. Науки о Земле. – 2015. – Вып. 3. – С. 7–10.
15. *Семериков В.В., Четина О.А., Баландина С.Ю., Шварц К.Г.* О биоразнообразии плесневых грибов техногенно-измененных почв на территории Пермского края // Геогр. вестн. – 2013. – Вып. 4. – С. 79–81.
16. *Ризниченко Г.Ю.* Математические модели в биофизике и экологии. – М.-Ижевск: Ин-т комп. исслед., 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. *Романова Е.Н., Мосолова Г.И., Береснева И.А.* Микроклиматология и ее значение для сельского хозяйства. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 244 с.
19. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т.М. Нистадта, Х. Ван Допа. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 351 с.
20. *Шкляев В.А., Ермакова Л.Н., Шкляева Л.С.* Исследование микроклимата города с целью оценки биометеорологических показателей селитебной территории// Геогр. вестн. – 2010. – № 3. – С. 52–59.
21. *Шкляев В.А., Шкляева Л.С.* Использование результатов наблюдений по температурному профилю для корректировки неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) // Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: Труды Второй Всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Казань: Отечество, 2013. – Т. II. – С. 151.
22. *Аристов С.Н., Фрик П.Г.* Крупномасштабная турбулентность в тонком слое неизотермической вращающейся жидкости // Механика жидкости и газа. – 1988. – № 4. – С. 48–55.
23. *Аристов С.Н., Шварц К.Г.* Вихревые течения в тонких слоях жидкости. – Киров: ВятГУ, 2011. – 207 с.
24. *Шварц К.Г.* Модели геофизической гидродинамики. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 2006. – 66 с.
25. *Шварц К.Г., Шкляев В.А.* Математическое моделирование мезомасштабных и крупномасштабных процессов переноса примеси в бароклинной атмосфере. – М.-Ижевск: Ин-т комп. исслед., 2015. – 156 с.

Поступила в редакцию  
30.05.17

---

**Шварц Константин Григорьевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и информатики

Пермский государственный национальный исследовательский университет  
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия  
E-mail: [kosch@psu.ru](mailto:kosch@psu.ru)

**Шварц Юлия Анатольевна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем и математических методов в экономике

Пермский государственный национальный исследовательский университет  
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия  
E-mail: [jul-schwarz@psu.ru](mailto:jul-schwarz@psu.ru)

**Шкляев Владимир Александрович**, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы

Пермский государственный национальный исследовательский университет  
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия  
E-mail: [shklyaev@psu.ru](mailto:shklyaev@psu.ru)

**Баландина Светлана Юрьевна**, заведующий лабораторией «Бактерицид»

Пермский государственный национальный исследовательский университет

ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия

E-mail: *bactericid@yandex.ru*

**Семериков Вадислав Васильевич**, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник НИС

Пермский государственный национальный исследовательский университет

ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия

E-mail: *vadislavsemerikov@yandex.ru*

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2018, vol. 160, no. 1, pp. 145–161

### Modeling of Bioaerosol Transport in Lower Atmosphere Layer with Account of Temperature and Humidity Heterogeneity

*K.G. Shvarts*<sup>\*</sup>, *Ya.A. Shvarts*<sup>\*\*</sup>, *V.A. Shklyayev*<sup>\*\*\*</sup>, *S.Yu. Balandina*<sup>\*\*\*\*</sup>, *V.V. Semerikov*<sup>\*\*\*\*\*</sup>

*Perm State University, Perm, 614990 Russia*

E-mail: <sup>\*</sup>*kosch@psu.ru*, <sup>\*\*</sup>*jul-schwarz@psu.ru*,

<sup>\*\*\*</sup>*shklyayev@psu.ru*, <sup>\*\*\*\*</sup>*bactericid@yandex.ru*, <sup>\*\*\*\*\*</sup>*vadislavsemerikov@yandex.ru*

Received May 30, 2017

#### Abstract

The paper describes a two-dimensional model of bioaerosol transport from a non-stationary source of admixture in the atmospheric boundary layer at the local level (the linear sizes of the studied area up to 40–50 km) taking into account the roughness and temperature and humidity inhomogeneity of the underlying surface. The development of model equations is based on the local equilibrium approach. They have been derived by averaging across the layer of the original three-dimensional equations of velocity, thermal conductivity, and air humidity, describing mesoscale atmospheric processes and pollutant transport. The possibility to create systems for local monitoring of bioaerosols on the basis of the developed model has been assessed. The necessary sources of meteorological and microbiological parameters and elements have been defined. All numerical calculations have been performed by the grid method (with the grid spacing of 200 m). The calculations have been performed for different weather conditions (in winter and summer). The numerical simulation of spores of micromycetes from a point source in the region of the Kama valley in Perm has been carried out with and without regard to their multiplication, as well as with regard to local air movements that occur due to temperature heterogeneity. During the winter period, bioaerosol is similar to a passive admixture based on its characteristics. The weak heterogeneity of the underlying surface covered with snow has little effect on air movement. In summer, the temperature heterogeneity of the underlying surface generates a local movement of the air, thereby influencing the direction of wind and increasing its velocity. This period is also characterized by micromycete multiplication, with significantly increases the maximum concentration of bioaerosols in the lower atmosphere layer.

**Keywords:** bioaerosols, atmospheric boundary layer, meteorological parameters, two-dimensional model, numerical solution

#### Figure Captions

Fig. 1. Mean value field in the temperature layer, °C (a) and water vapor weight fraction, g/kg (b) in summer.

Fig. 2. Current function perturbations field in summer, m<sup>2</sup>/s (a) and concentration field in winter, CFU/m<sup>3</sup> (b).

Fig. 3. Changes in aerosol concentration ( $\Delta c$ ) caused by temperature (a) and humidity (b) heterogeneity, CFU/m<sup>3</sup>.

Fig. 4. Changes in aerosol concentration ( $\Delta c$ ) caused by temperature and humidity heterogeneity (a) and concentration field with account of temperature and humidity (b) in summer, CFU/m<sup>3</sup>.

### References

1. Andreeva I.S., Belan B.D., Borodulin A.I., Burov G.A., Marchenko Yu.V., Olkin S.E., Panchenko M.V., Petrischenko V.A., Piyankov O.V., Reznikova I.K., Safatov A.S., Sergeev A.N., Steshanova E.V. The study of microorganisms variability in the atmospheric aerosol of Western Siberia. *Opt. Atmos. Okeana*, 2000, vol. 13, nos. 6–7, pp. 639–644. (In Russian)
2. Borodulin A.I., Safatov A.S., Belan B.D., Panchenko M.V., Penenko V.V., Tsvetova E.A. Altitude profiles of concentrations of bioaerosols in the troposphere of southern West Siberia. *Opt. Atmos. Okeana*, 2005, vol.18, no. 8, pp. 694–698. (In Russian)
3. Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories – a review and bibliography. *Atmos. Environ.*, 1998, vol. 32, no. 6, pp. 947–966. doi: 10.1016/S1352-2310(97)00457-3.
4. Penenko V.V., Tsvetova E.A. Modeling of pollutant transport in direct and inverse problems of climate and environmental monitoring and prediction. *Opt. Atmos. Okeana*, 1999, vol. 12, no. 6, pp. 482–488. (In Russian)
5. Penenko V.V., Tsvetova E.A. Some aspects of solving interrelated problems of ecology and climate. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2000, vol. 41, no. 5, pp. 907–914. doi: 10.1007/BF02468737.
6. Penenko V., Baklanov A., Tsvetova E. Methods of sensitivity theory and inverse modeling for estimation of source parameters. *Future Gener. Comput. Syst.*, 2002, vol. 18, no. 6, pp. 661–671. doi: 10.1007/978-1-4020-5877-6\_2.
7. Shvarts K.G., Shklyayev V.A. Methodological approaches to the creation of a system of local settlement monitoring of atmospheric bioaerosols. In: *Geoinformatsionnoe obespechenie prostranstvennogo razvitiya Permskogo kraja* [GIS Software for Spatial Development of Perm Region]. Perm, Permsk. Gos. Nats. Issled. Univ., 2013, no. 6, pp. 56–60. (In Russian)
8. Shatrov A.V., Shvarts K. G. Numerical modeling of mesoscale atmospheric impurity transport processes in the environs of the city of Kirov. *Fluid Dyn.*, 2011, vol. 46, no. 2, pp. 332–339. doi: 10.1134/S0015462811020165.
9. Shvarts K.G., Shklyayev V.A. Numerical modeling of mesoscale atmospheric transport processes of multicomponent impurities at peat firing. *Vychisl. Mekh. Sploshnykh Sred*, 2012, vol. 5, no. 3, pp. 274–283. doi: 10.7242/1999-6691/2012.5.3.32. (In Russian)
10. Shvarts K.G., Shvarts Yu.A., Shklyayev V.A. Two-dimensional model of mesoscale processes in the lower atmosphere with allowance for inhomogeneity of temperature and air humidity. *Vychisl. Mekh. Sploshnykh Sred*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 5–15. doi: 10.7242/1999-6691/2015.8.1.1. (In Russian)
11. Aloyan A.E. *Dinamika i kinematika gazovykh primesei i aerazolei v atmosfere* [Dynamics and Kinematics of Gas Impurities and Aerosols in the Atmosphere]. Moscow, IVM Ross. Akad. Nauk, 2002. 201p. (In Russian)
12. Krivonogih K.N., Chetina O.A. Thermotolerance and proteolytic activity of micromycetes in hospital environment. *Mezhdistsiplinarnye issledovaniya: Sb. materialov nauch.-pract. konf.* [Interdisciplinary Research: Proc. Sci.-Pract. Conf.]. Vol. 1. Perm, Permsk. Gos. Nats. Issled. Univ., 2013, pp. 39–42. (In Russian)
13. Chetina O.A., Kir'yanova I.N., Balandina S.Yu., Krylova I.O. Evaluation of the pathogenicity and toxicity of some common fungi in the residential areas of the city of Perm. *Vestn. Molodykh Uch. PGNIU*, 2011, no. 1, pp. 214–223. (In Russian)
14. Balandina S.Yu., Semerikov V.V., Shvarts K.G. Studying the seasonal dynamics of the content of micromycetes in the air near the treatment center. *Vestn. Udmurt. Univ., Ser. 6: Biol. Nauki Zemle*, 2015, no. 3, pp. 7–10. (In Russian)
15. Semerikov V.V., Chetina O.A., Balandina S.Yu., Shvarts K.G. Biodiversity of mold fungi in anthropogenically modified soils at the territory of Perm krai. *Geogr. Vestn.*, 2013, no. 4, pp. 79–81. (In Russian)

16. Riznichenko G.Yu. *Matematicheskie modeli v biofizike i ekologii* [Mathematical Models in Biophysics and Ecology]. Moscow, Izhevsk, Inst. Komp'yut. Nauk, 2003. 184 p. (In Russian)
17. Arguchintsev V.K., Arguchintseva A.V. *Modelirovanie mesomasshtabnykh gidrotermodynamicheskikh protsessov i perenosa antropogennykh primesei v atmosfere i gidrosfere regiona oz. Baikal* [Modelling of Mesoscale Hydro-Thermodynamic Processes and Transport of Anthropogenic Impurities in Atmosphere and Hydrosphere of Baikal Region]. Irkutsk, Izd. Irkutsk. Gos. Univ., 2007. 255 p. (In Russian)
18. Romanova E.N., Masolova G.I., Beresneva I.A. *Mikroklimatologiya i ee znachenie dlya sel'skogo khozyaistva* [Microclimatology and its Importance for Agriculture]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983. 244p. (In Russian)
19. *Atmosfernaya turbulentnost' i modelirovanie rasprostraneniya primesei* [Atmospheric Turbulence and Impurity Spread Modeling]. Neistadt E.T.M., van Dop X. (Eds.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985. 351 p. (In Russian)
20. Shklyayev V.A., Ermakova L.N., Shklyayeva L.S. *Issledovanie mikroklimata goroda s tsel'yu otsenki biometeorologicheskikh pokazatelei selitebnoi territorii* [Study of Urban Microclimate to Assess Biometeorological Indicators of Residential Areas]. *Geogr. Vestn.*, 2010, no. 3, pp. 52–59. (In Russian)
21. Shklyayev V.A., Shklyayeva L.S. Using the results of observations on the temperature tool to adjust adverse weather conditions (AWC). *Okruzhayushchaya sreda i ustoichivoe razvitie regionov: Trudy Vtoroi Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem* [Environment and Sustainable Development of Regions: Proc. 2nd Russ. Sci. Conf. Int. Participation]. Kazan, Otechestvo, 2013, vol. II, p. 151. (In Russian)
22. Aristov S.N., Frik P.G. Large-scale turbulence in a thin layer of nonisothermal rotating fluid. *Fluid Dyn.*, vol. 23, no. 4, pp. 522–528. doi: 10.1007/BF01055074.
23. Aristov S.N., Shvarts K.G. *Vikhreyye techeniya v tonkikh sloyakh zhidkosti* [Vortex Flow in Thin Liquid Layers]. Kirov, VyatGU, 2011. 207 p. (In Russian)
24. Shvarts K.G. *Modeli geofizicheskoi gidrodinamiki* [Models of Geophysical Hydrodynamics]. Perm, Permsk. Gos. Univ., 2006. 66 p. (In Russian)
25. Shvarts K.G., Shklyayev V.A. *Matematicheskoe modelirovanie mesomasshtabnykh i krupnomasshtabnykh protsessov perenosa primesei v baroklinnoi atmosfere* [Mathematical Modelling of Mesoscale and Large-Scale Processes of Admixture Transport in Baroclinic Atmosphere]. Moscow, Izhevsk, Inst. Komp'yut. Issled., 2015. 156 p. (In Russian)

**Для цитирования:** Шварц К.Г., Шварц Ю.А., Шкляев В.А., Баландина С.Ю., Семериков В.В. Моделирование переноса биоаэрозолей в нижнем слое атмосферы с учетом неоднородностей температуры и влажности // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 1. – С. 145–161.

**For citation:** Shvarts K.G., Shvarts Ya.A., Shklyayev V.A., Balandina S.Yu., Semerikov V.V. Modeling of bioaerosol transport in lower atmosphere layer with account of temperature and humidity heterogeneity. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 1, pp. 145–161. (In Russian)