

## Оценка влияния лесозащитных полос на перенос диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) в приземном слое атмосферы с помощью гидродинамической модели

М. С. Рыжова<sup>1</sup>, Ю. В. Мухартова<sup>1,a</sup>, Н. Е. Шапкина<sup>1</sup>, А. В. Ольчев<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра математики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>2</sup>Институт проблем экологии и эволюции имени А. Н. Северцова РАН.

Россия, Москва, Ленинский просп., д. 33.

E-mail: <sup>a</sup> muhartova@yandex.ru, <sup>b</sup> aoltche@yandex.ru

Статья поступила 16.06.2015, подписана в печать 04.08.2015.

Численная двумерная гидродинамическая модель применена для оценки влияния лесозащитных полос различных размеров на турбулентный перенос диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) в приземном слое атмосферы. Результаты расчетов показали, что защитная лесополоса приводит к существенному ослаблению горизонтального переноса  $\text{SO}_2$  за счет уменьшения скорости воздушного потока и поглощения примеси кронами деревьев. Коэффициент ослабления потока примеси растет с увеличением размеров защитной лесополосы и уменьшением высоты источника загрязнения.

*Ключевые слова:* двумерная гидродинамическая модель, турбулентный перенос, атмосферное загрязнение, сухое осаждение  $\text{SO}_2$ , полоторное замыкание системы усредненных уравнений гидродинамики, лесозащитные полосы.

УДК: 519.63. PACS: 02.30.Jr, 92.60.Fm.

### Введение

Задаче изучения процесса переноса атмосферных примесей в приземном слое атмосферы в настоящее время посвящено огромное число экспериментальных и теоретических исследований [1–4]. Это обусловлено прежде всего усилившейся в последние годы антропогенной нагрузкой на окружающую среду и необходимостью разработки и проведения комплексных мероприятий по снижению негативного влияния антропогенного загрязнения воздуха на природные экосистемы и улучшению качества и условий жизни населения.

Априори хорошо известно, что растительность, и прежде всего леса, активно поглощает аэрозоли и газовые примеси из атмосферного воздуха, снижая уровень атмосферного загрязнения. Количественные оценки подобного влияния пока очень немногочисленны, что связано как с отсутствием необходимого оборудования для проведения мониторинговых измерений концентрации газовых примесей в воздухе, так и с отсутствием репрезентативных подходов для адекватного количественного (модельного) описания процесса переноса газовых примесей от источников загрязнения в приземном слое воздуха в условиях пространственно-неоднородного антропогенного ландшафта.

В рамках настоящей работы на основе двумерной гидродинамической модели были проведены расчеты переноса воздушным потоком пассивной загрязняющей газовой примеси (диоксида серы  $\text{SO}_2$ ) от двух видов антропогенных источников загрязнения (автомобильной дороги и заводской трубы) и получены

оценки влияния на горизонтальные потоки защитной лесополосы различных размеров. Диоксид серы — достаточно вредное вещество, особенно опасное для людей с болезнями органов дыхания, например, астмой. Его выбрасывают в атмосферу топливосжигающие предприятия и заводы, работающие на мазуте и угле (например, ТЭЦ или ТЭС). Также выделение  $\text{SO}_2$  характерно для двигателей внутреннего сгорания автомобилей.

### 1. Двумерная модель турбулентного движения воздуха в приземном слое атмосферы при наличии растительности

Для решения задачи переноса пассивных газовых примесей в приземном слое воздуха в случае нейтральной стратификации в работе была использована двумерная модель [16], основанная на усредненных уравнениях гидродинамики. Существенным преимуществом данной модели является ее способность описывать процессы переноса над горизонтально неоднородной поверхностью, и в том числе на границе растительных сообществ, рассматриваемых как сплошная проницаемая среда, оказывающая сопротивление воздушному потоку.

Будем рассматривать задачу в некоторой прямоугольной области с размерами  $x \in [-L, L]$ ,  $z \in [h_0, H]$ . Система уравнений для усредненной по пространству и времени скорости ветра  $\mathbf{V}(x, z, t) = \{U(x, z, t), W(x, z, t)\}$ , где  $U$  и  $W$  — горизонтальная и вертикальная компоненты скорости ветра соответственно и  $\delta P$  — усредненного отклонения давления от гидростатического, имеет

вид

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} &= \\ &= -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta P}{\rho_0} + E \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2K \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial W}{\partial x} \right) + F_U, \\ \frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + W \frac{\partial W}{\partial z} &= \\ &= -\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\delta P}{\rho_0} + E \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left( 2K \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial U}{\partial z} \right) + F_W, \\ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — плотность воздуха,  $E$  — кинетическая энергия турбулентного движения,  $K$  — коэффициент турбулентной диффузии, величины  $F_U$ ,  $F_W$  описывают изменение скорости воздушного потока при взаимодействии с растительностью:

$$\mathbf{F} = \{F_U, F_W\} = -c_d \text{LAD} |\mathbf{V}| \mathbf{V}.$$

Здесь LAD — суммарная односторонняя площадь поверхности листьев деревьев в единице объема,  $c_d$  — коэффициент аэродинамического сопротивления элементов растительности (в нашем исследовании он был принят равным 0.2).

Для замыкания системы уравнений (1) будем использовать следующее выражение для коэффициента турбулентной диффузии:  $K = C_\mu E^2 \varepsilon^{-1}$ , где  $C_\mu = 0.09$  — безразмерный коэффициент пропорциональности [7],  $\varepsilon$  — скорость диссипации турбулентной кинетической энергии  $E$ . Система уравнений для  $E$  и  $\varphi = \varepsilon E^{-1}$  имеет вид [7–9, 16]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + U \frac{\partial E}{\partial x} + W \frac{\partial E}{\partial z} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K}{\sigma_E^\varphi} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K}{\sigma_E^\varphi} \frac{\partial E}{\partial z} \right) + P_E - \varepsilon, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + U \frac{\partial \varphi}{\partial x} + W \frac{\partial \varphi}{\partial z} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K}{\sigma_\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K}{\sigma_\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \\ &\quad + \frac{\varphi}{E} (C_{\varphi 1} P_E - C_{\varphi 2} \varepsilon) + \Delta_\varphi, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где  $\sigma_E^\varphi = 2$  и  $\sigma_\varphi = 2$  — числа Прандтля для  $E$  и  $\varphi$  соответственно [10],  $P_E$  — сдвиговая генерация турбулентной кинетической энергии. Выражение для  $P_E$  в двумерном случае записывается следующим образом:

$$P_E = 2K \left( \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 \right) + K \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2.$$

Множители  $C_{\varphi 1} = 0.52$  и  $C_{\varphi 2} = 0.8$  в правой части уравнения для функции  $\varphi$  являются модельными константами [10], а слагаемое  $\Delta_\varphi$  характеризует

увеличение диссипации турбулентной кинетической энергии за счет взаимодействия с растительностью [7]:

$$\Delta_\varphi = 12C_\mu^{1/2} (C_{\varphi 2} - C_{\varphi 1}) c_d \text{LAD} |\mathbf{V}| \varphi.$$

Боковые границы  $x = \pm L$  расчетной области являются свободными. Обычно на свободных границах используют так называемые условия сноса [17], которые заключаются в том, что производная искомой функции по нормали к свободной границе полагается равной нулю. В нашем случае эти условия будут иметь вид

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = \left. \frac{\partial E}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = \left. \frac{\partial}{\partial x} \delta P \right|_{x=\pm L} = 0. \quad (3)$$

На верхней границе  $z = H$  также будем использовать условия сноса для всех функций, кроме избыточного давления:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=H} = \left. \frac{\partial W}{\partial z} \right|_{z=H} = \left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_{z=H} = \left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z=H} = 0. \quad (4)$$

При условии, что верхняя граница расчетной области находится достаточно далеко от расположенных на поверхности земли элементов шероховатости, можно сделать предположение, что избыточное давление  $\delta P$  при  $z = H$  равно нулю.

На нижней границе области для горизонтальной компоненты скорости ветра воспользуемся условием [18, 19]:

$$K \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=h_0} = \frac{\kappa C_\mu^{1/4} E^{1/2}}{\ln((z-d)/z_0)} U \Big|_{z=h_0}, \quad (5)$$

где  $\kappa = 0.4$  — эмпирическая постоянная фон Кармана,  $z_0$  — параметр шероховатости,  $d$  — высота слоя вытеснения. Для остальных функций используем следующие условия:

$$\left. W \right|_{z=h_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_{z=h_0} = 0, \\ \left. \varphi \right|_{z=h_0} = \frac{C_\mu E}{K} \Big|_{z=h_0}, \quad \left. \frac{\partial}{\partial z} \delta P \right|_{z=h_0} = 0. \quad (6)$$

Будем решать систему уравнений (1)–(2) с граничными условиями (3)–(6) как задачу на установление, используя в качестве начального условия для  $U$  логарифмическое распределение скорости ветра по высоте [5, 6], справедливое в случае однородной подстилающей поверхности. Также предположим, что  $W$  и  $\delta P$  равны нулю в начальный момент времени, а при  $t = 0$  зависимость функций  $E$  и  $K$  от  $z$  описывается в соответствии с полуэмпирическими формулами, справедливыми для однородной подстилающей поверхности [6].

## 2. Перенос $\text{SO}_2$ воздушным потоком и его поглощение растительностью

После того, как в ходе решения начально-краевой задачи (1), (2), (3)–(6) получено установившееся поле скорости ветра  $\mathbf{V} = \{U, W\}$  и распределение

коэффициента турбулентной диффузии  $K$ , решается начально-краевая задача для усредненной концентрации  $C$  переносимого воздушным потоком вещества. Уравнение переноса для  $C$  имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + W \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K}{Sc} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K}{Sc} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_C,$$

где  $Sc$  — турбулентное число Шмидта [20, 21], которое в нашей работе принято равным 0.75, а функция  $F_C$  описывает источники и стоки переносимого вещества:

$$F_C = F_{\text{source}} + F_{\text{sink}}.$$

В качестве начального условия в задаче для  $C$  возьмем некоторое фоновое значение концентрации  $\text{SO}_2$  в атмосфере:  $C|_{t=0} = C_0 = 6 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

В качестве граничных условий для  $C$  используем условия сноса на свободных границах и условие равенства нулю потока  $C$  на нижней границе области:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = 0, \quad \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=h_0, z=H} = 0.$$

Лабораторные и полевые исследования показывают, что скорость поглощения  $\text{SO}_2$  растениями (сухое осаждение) определяется интенсивностью турбулентной и молекулярной диффузии в слое воздуха внутри растительности, а также устьичной проводимостью, характеризующей пропускную способность устьиц, расположенных на поверхности листьев растений, для атмосферных газов [22–24]. В случае наличия влаги на поверхности листьев (например, роса или задержанные листвой капли дождя) атмосферный  $\text{SO}_2$  может вступать в химическую реакцию с водой с образованием сернистой кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_3$  (влажное осаждение). Также в виде  $\text{H}_2\text{SO}_3$  он может попадать на растения и с атмосферными осадками.

В рамках нашего исследования будем рассматривать только сухое осаждение, скорость которого будет определяться исключительно устьичной проводимостью, и в наиболее простом случае может быть представлена как  $V_d = \frac{Q}{C}$ , где  $Q$  — поток поглощаемого  $\text{SO}_2$ ,  $C$  — его концентрация. Опубликованные в литературе значения скорости сухого осаждения  $V_d$  для  $\text{SO}_2$  в зависимости от типа и видового состава растительности изменяются в пределах от 0.1 до 2  $\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$  [22–24].

Таким образом, растительность является стоком  $\text{SO}_2$  из атмосферы и скорость поглощения  $\text{SO}_2$  растительностью может быть представлена как

$$F_{\text{sink}}(x, z, t) = \text{LAD}(z) \cdot Q(x, z, t) = V_d \cdot \text{LAD}(z) \cdot C(x, z, t).$$

В рамках нашего исследования в качестве источника  $\text{SO}_2$  будем рассматривать автомобильную дорогу шириной  $l_{\text{source}}$ , расположенную перпендикулярно плоскости  $Oxz$ , и трубу небольшого промышленного предприятия высотой  $h_{\text{source}} = 20 \text{ м}$ .

При рассмотрении переноса  $\text{SO}_2$  воздушным потоком от автомобильной дороги в двумерной задаче

источником загрязнения служит поперечное сечение дороги, которое моделируется в виде прямоугольника шириной  $l_{\text{source}}$  и высотой  $z_{\text{source}}$ , расположенного у нижней границы расчетной области. При моделировании процесса переноса  $\text{SO}_2$  от трубы предприятия также будем использовать эквивалентный источник, расположенный на высоте 20 м над поверхностью земли.

### 3. Результаты модельных расчетов

При расчетах переноса  $\text{SO}_2$  от автомобильной дороги было сделано предположение, что она имеет ширину  $l_{\text{source}} = 10 \text{ м}$ , и мощность источника  $\text{SO}_2$  составляет  $329.76 \text{ мкг} \cdot \text{с}^{-1}$ . На первом шаге были проведены расчеты для случая открытой ровной поверхности земли без каких-либо препятствий (рис. 1).

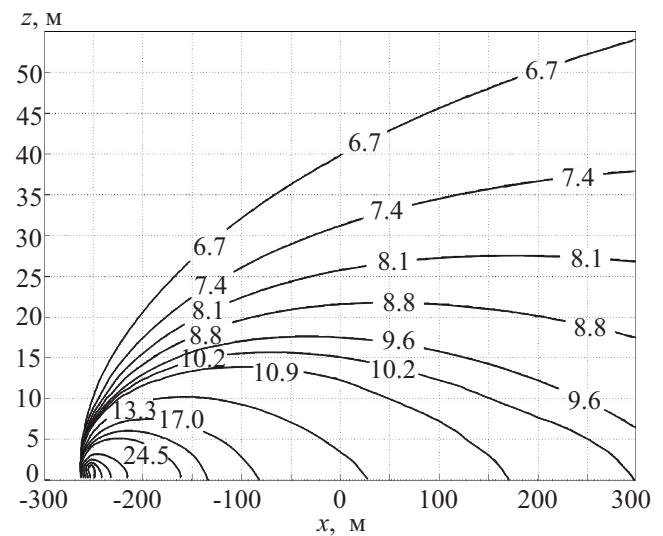


Рис. 1. Распределение концентрации  $\text{SO}_2$  [ $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ ] вблизи автотрассы в направлении движения воздушного потока при условии отсутствия вокруг автомобильной дороги каких-либо препятствий. Предполагается, что ветер дует слева направо. Скорость ветра на высоте 20 м принята равной  $3.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

На втором шаге в качестве возможного препятствия воздушному потоку были рассмотрены защитные лесополосы различной ширины. Было сделано предположение, что исследуемая лесополоса состоит преимущественно из мелколиственных пород деревьев (береза, осина, ольха) высотой около 20 м. Предполагается, что край лесополосы расположен в 20 м от автомобильной дороги. Индекс листовой поверхности растительности в лесополосе  $\text{LAI} = 5$ . Средняя скорость сухого осаждения  $\text{SO}_2$  в кронах деревьев  $V_d = 1.0 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ , что соответствует малооблачным погодным условиям с температурой воздуха в диапазоне  $20\text{--}25^\circ\text{C}$  при достаточных условиях почвенного увлажнения. При динамической скорости  $u_* = 0.4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и выбранных параметрах лесополосы средняя скорость ветра непосредственно над кронами деревьев составляет  $2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

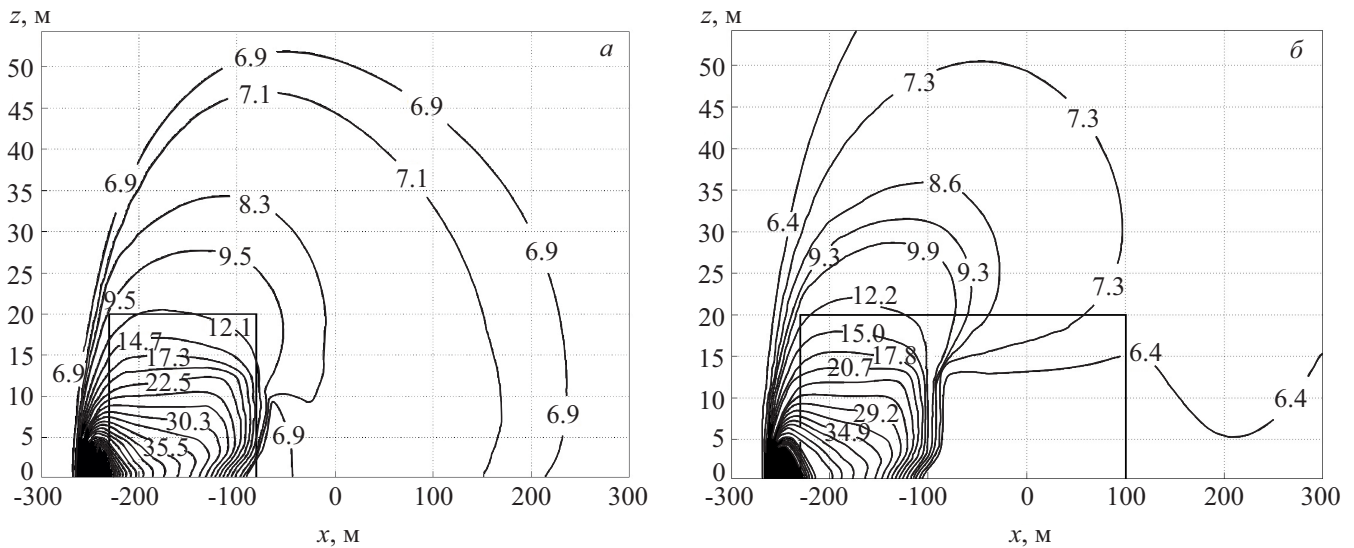


Рис. 2. Распределение концентрации SO<sub>2</sub> [мкг·м<sup>-3</sup>] вблизи автотрассы в направлении движения воздушного потока при наличии защитной лесополосы шириной 150 м (а) и 330 м (б). Ветер дует слева направо

Результаты расчетов распределения концентрации SO<sub>2</sub> в приземном слое воздуха при наличии двух лесополос шириной 150 и 330 м (рис. 2) показывают, что наличие лесополосы существенно меняет пространственную картину распределения концентрации SO<sub>2</sub> (при сравнении с открытой безлесной поверхностью). Это происходит как за счет прямого поглощения SO<sub>2</sub> растительностью (сухого осаждения), так и благодаря изменению скорости и направления воздушного потока при его взаимодействии с элементами растительности в лесополосе.

На рис. 3 приведена зависимость плотности горизонтального потока SO<sub>2</sub> (W<sub>x</sub>) от высоты при разной ширине лесополосы на расстоянии 510 м от источника загрязнения. При наличии установившегося воздушного потока с усредненной скоростью U

выражение для W<sub>x</sub> может быть записано как

$$W_x = W_x^m + W_x^{turb} = U(C - C_0) - K_C \frac{\partial C}{\partial x},$$

где  $K_C = \frac{K}{Sc}$ .

В табл. 1 приведены средние значения горизонтальных потоков на расстоянии 510 м от источника:

$$\langle W_x \rangle = \frac{1}{h} \int_0^h W_x dz.$$

Таблица 1

**Зависимость интегрального потока SO<sub>2</sub> от ширины защитной лесополосы для случая, когда в качестве источника загрязнения была рассмотрена автомобильная дорога**

Ширина лесополосы, м	Усредненный поток, мкг·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	Ослабление потока, %
0	10.86	—
30	6.85	37
70	4.07	63
150	2.96	73
230	2.65	76
330	2.12	80
380	1.83	83

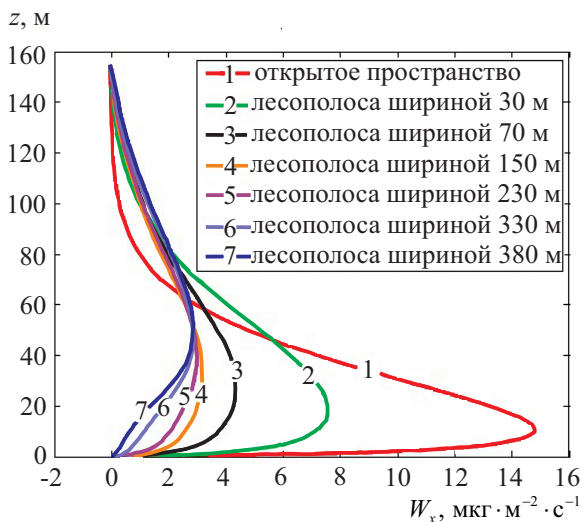


Рис. 3. Зависимость горизонтального потока SO<sub>2</sub> от ширины лесополосы на расстоянии 510 м от источника загрязнения (автотрасса)

Расчеты показывают, что наличие лесополосы даже минимальной ширины позволяет снизить значение горизонтального потока SO<sub>2</sub> на расстоянии 510 м от источника почти на 40% с 11 до 7 мкг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Для лесополосы шириной 150 м и более снижение потока SO<sub>2</sub> вблизи поверхности достигает 73% и более (рис. 3 и табл. 1).

Для оценки влияния высоты источника загрязнения на скорость переноса загрязняющей примеси в работе в качестве источника SO<sub>2</sub> была рассмотрена труба небольшого промышленного предприятия.

При расчетах было сделано предположение, что источник загрязнения расположен на высоте 20 м над земной поверхностью и имеет одинаковую с автомобильной дорогой мощность.

Результаты расчетов показывают, что расположение источника SO<sub>2</sub> над поверхностью земли приводит к существенному увеличению площади загрязнения и скорости распространения загрязняющей примеси. Это связано, прежде всего, с более высокими скоростями ветра вблизи источника загрязнения и огибанием воздушным потоком с примесью препятствия по его верхней границе без существенного ослабления (рис. 4, 5).

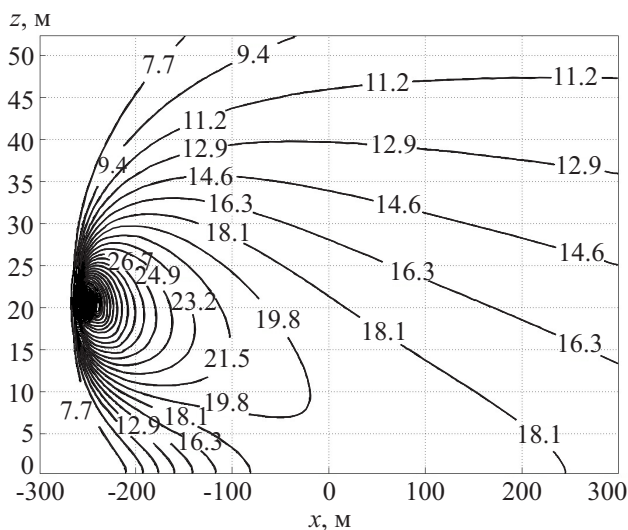
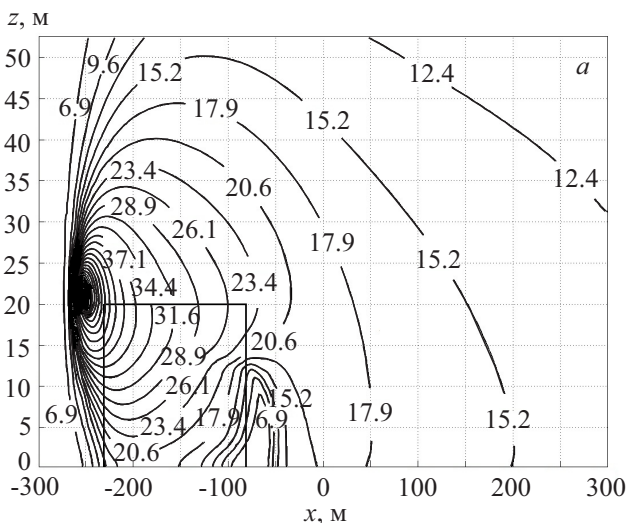


Рис. 4. Распределение концентрации SO<sub>2</sub> [мкг·м<sup>-3</sup>] вблизи заводской трубы в направлении движения воздушного потока при отсутствии препятствий. Ветер дует слева направо

Анализ зависимости горизонтальных потоков SO<sub>2</sub> от ширины защитной лесополосы показывает, что в случае приподнятого положения источника



загрязнения величина потока SO<sub>2</sub> существенно слабее зависит от ширины лесополосы, чем в случае расположения источника загрязнения у поверхности земли (рис. 6, табл. 2). В частности, вблизи поверхности земли коэффициент ослабления усредненного потока SO<sub>2</sub> для лесополосы шириной 380 м составляет 52 %, а для лесополосы шириной 30 м — всего 18 % (табл. 2).

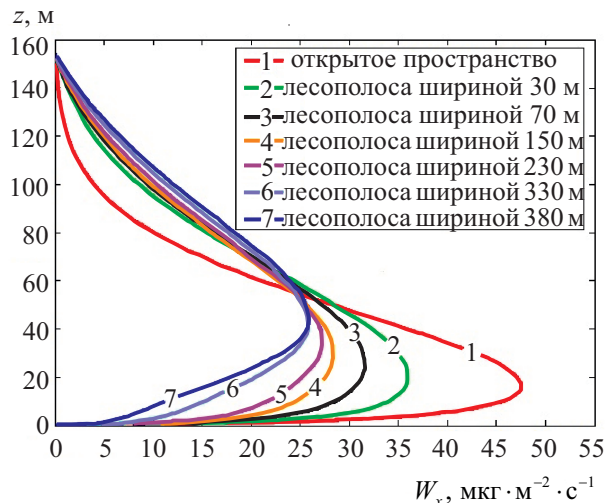


Рис. 6. Зависимость горизонтального потока SO<sub>2</sub> от ширины лесополосы на расстоянии 510 м от источника загрязнения (заводская труба)

**Заклучение**

На основе разработанной двумерной гидродинамической модели получены данные о распределении концентрации SO<sub>2</sub> вокруг источников загрязнения, а также значения горизонтальных потоков загрязняющей примеси при отсутствии и наличии лесозащитных полос. Было показано, что лесополоса существенно снижает горизонтальный поток SO<sub>2</sub> как за счет того, что, являясь механической преградой,

Рис. 5. Распределение концентрации SO<sub>2</sub> [мкг·м<sup>-3</sup>] вблизи заводской трубы в направлении движения воздушного потока при наличии лесополосы шириной 150 м (а) и 330 м (б). Ветер дует слева направо

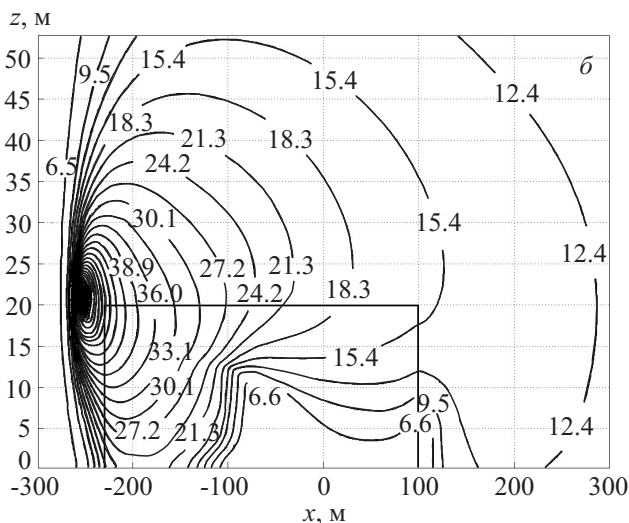


Таблица 2

**Зависимость интегрального потока SO<sub>2</sub> от ширины защитной лесополосы для случая, когда в качестве источника загрязнения была рассмотрена заводская труба**

Ширина лесополосы, м	Усредненный поток, мкг·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	Ослабление потока, %
0	41.58	—
30	34.11	18
70	30.27	27
150	27.14	35
230	25.48	39
330	21.88	47
380	20.01	52

она перераспределяет воздушные потоки, так и за счет прямого поглощения SO<sub>2</sub> кронами деревьев.

В ходе расчетов было установлено, что защитная лесополоса с минимальной шириной 30 м позволяет снизить значение горизонтального потока SO<sub>2</sub> на расстоянии 510 м от источника загрязнения, расположенного на поверхности, почти на 40% и в случае его расположения над поверхностью земли на высоте крон деревьев — лишь на 18%.

Результаты расчетов показали, что разработанная математическая модель может служить эффективным инструментом, позволяющим находить пространственное распределение концентрации примеси в приземном слое воздуха без привлечения измерительного оборудования. Она может также быть пригодным инструментом для разработки защитных мероприятий (в том числе проектирования лесозащитных полос) и строительства сооружений, снижающих потоки загрязняющих веществ от источников загрязнения в окружающем воздухе.

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда (грант 14-14-00956).

#### Список литературы

1. Алоян А.Е., Йорданов Д.Л., Пененко В.В. // Метеорология и гидрология. 1981. № 8. С. 32.
2. Austin J., Brimblecombe P., Sturges W. // Elsevier Science. 2002. P. 569.

3. Kampa M., Castanas E. // Environ. Pollut. 2008. **151**. P. 362.
4. Anderson J.O., Thundiyil J.G., Stolbach A. // J. Med. Toxicol. 2012. **8**. P. 166.
5. Wyngaard J.C. Turbulence in the Atmosphere. Cambridge, 2010.
6. Garratt J.R. The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge, 1992.
7. Sogachev A., Panferov O. // Boundary-Layer Meteorol. 2006. **121**, N 2. P. 229.
8. Sogachev A. // Boundary-Layer Meteorol. 2009. **130**, N 3. P. 423.
9. Sogachev A., Menzhulin G.V., Heimann M., Lloyd J. // Tellus. 2002. **54B**, N 5. P. 784.
10. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, Inc. La Cañada, CA, 1998.
11. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М., 1994.
12. Дубов А.С., Быкова Л.П., Марунич С.В. Турбулентность в растительном покрове. Л., 1978.
13. Бояришинов М.Г., Горемыкин В.Д. // Матем. модел. 2004. **16**, № 7. С. 31.
14. Ольчев А.В., Радлер К. // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2009. **11**, № 1(7). С. 1538.
15. Olchev A., Radler K., Sogachev A. et al. // Ecological Modelling. 2009. **220**. P. 3046.
16. Мухартова Ю.В., Левашова Н.Т., Ольчев А.В., Шапкина Н.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 1. С. 15. (Mukhartova Yu.V., Levashova N.T., Olchev A.V., Shapkina N.E. // Moscow University Phys. Bull. 2015. 70. N 1. P. 14.)
17. Елизарова Т.Г. Математические модели и численные методы в динамике газа и жидкости. М., 2005.
18. Krzikalla F. Numerical Investigation of the Interaction between Wind and Forest under Heterogeneous Conditions: Diploma Thesis. Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, 2005.
19. Foudhil H., Brunet Y., Caltagirone J.P. // Environ. Fluid Mech. 2005. **5**. P. 247.
20. Stull R.B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Dordrecht, 1988.
21. Flesch T.K., Prueger J.H., Hatfield J.L. // Agricult. and Forest Meteorol. 2002. **111**. P. 299.
22. Fowler D., Unsworth M.H. // Quart. J. R. Met. Soc. 1979. **105**. P. 767.
23. Gravenhorst G., Olchev A., Sogachev A. et al. // Meteorologische Zeitschrift. 2005. **14**, N 2. P. 117.
24. Erisman J.W., Baldocchi D. // Tellus. 1994. **46B**. P. 159.

#### **An impact assessment of forest belts on the SO<sub>2</sub> transport within the atmospheric boundary layer using a hydrodynamic model**

**M. S. Ryzhova<sup>1</sup>, Yu. V. Mukhartova<sup>1,a</sup>, N. E. Shapkina<sup>1</sup>, A. V. Oltchev<sup>2,b</sup>**

<sup>1</sup> Department of Mathematics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

<sup>2</sup> Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: <sup>a</sup> mukhartova@yandex.ru, <sup>b</sup> aoltche@yandex.ru.

A numerical two-dimensional hydrodynamic model was used to describe the influence of forest belts of different sizes on turbulent transport of SO<sub>2</sub> within the atmospheric surface layer. The results of the model calculations showed that the presence of a forest belt results in a substantial reduction of the horizontal

SO<sub>2</sub> flux due to the decrease of the wind speed and the absorption of SO<sub>2</sub> by tree crowns. The extinction coefficient of SO<sub>2</sub> flux increases with an increase in the forest belt size and decrease with the pollution source height.

*Keywords:* two-dimensional hydrodynamic model, turbulent transport, atmospheric pollution, dry deposition of SO<sub>2</sub>, one-and-a-half closure of averaged hydrodynamic equations, forest belts.

PACS: 02.30.Jr, 92.60.Fm.

*Received 16 June 2015.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2015).

#### **Сведения об авторах**

1. Рыжова Мария Сергеевна — аспирант; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: maria.msu.iff@gmail.com.
2. Мухартова Юлия Вячеславовна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: muhartova@yandex.ru.
3. Шапкина Наталья Евгеньевна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: neshapkina@mail.ru.
4. Ольчев Александр Валентинович — канд. геогр. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: aoltche@yandex.ru.