

УДК: 51-73

Трехмерное моделирование турбулентного переноса в приземном слое атмосферы с применением теории контрастных структур

Н. Т. Левашова^{1,а}, Ю. В. Мухартова¹, А. В. Ольчев²

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН,
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский пр., д. 33

E-mail: ^а natasha@npanalytica.ru

Получено 31 января 2016 г.,
после доработки 14 марта 2016 г.

Представлена трехмерная гидродинамическая модель для описания пространственной структуры поля скорости ветра и турбулентного обмена в приземном слое атмосферы над неоднородным растительным покровом. Взаимодействие воздушного потока с растительностью моделировали с помощью теории контрастных структур. На основе модельных экспериментов на примере сплошной вырубки показано существенное влияние неоднородной растительности на поле скорости ветра и турбулентный обмен между земной поверхностью и атмосферой. Полученные результаты хорошо согласуются с данными полевых экспериментов и результатами выполненных ранее модельных расчетов с применением альтернативных моделей.

Ключевые слова: трехмерная гидродинамическая модель, турбулентный перенос, контрастная структура, сплошная вырубка, приземный слой атмосферы

Three-dimensional modelling of turbulent transfer in the atmospheric surface layer using the theory of contrast structures

N. T. Levashova¹, Ju. V. Muhartova¹, A. V. Olchev²

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, 1/2 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia

²A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of RAS, 33 Leninsky pr., Moscow, 119071, Russia

Abstract. — A three-dimensional (3D) hydrodynamic model to describe the spatial patterns of wind and turbulence characteristics in the atmospheric surface layer over inhomogeneous vegetation cover is presented. To describe the interaction of air flow with vegetation the theory of contrast structures is used. The numerical experiments provided by a developed model to assess the impact of small clear-cutting on wind and turbulent regime in the atmospheric surface layer showed a significant influence of heterogeneous vegetation on the wind field and the turbulent exchange processes between the land surface and the atmosphere. Obtained results give a reasonable agreement with field experimental data and results of numerical experiments provided using alternative models.

Keywords: 3D hydrodynamic model, turbulent exchange, contrast structure, clear-cut area, atmospheric surface layer

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 355–367 (Russian).

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 14-14-00956.

Введение

Задача адекватного описания процессов переноса парниковых газов между земной поверхностью и атмосферой требует развития универсальных модельных подходов, позволяющих смоделировать поле скорости ветра и турбулентный режим приземного слоя воздуха с учетом неоднородной земной поверхности со сложным рельефом и мозаичным растительным покровом. Большинство современных моделей описывают процессы переноса в приземном слое через решение системы уравнений Навье–Стокса и скалярного уравнения неразрывности [Panofsky, Dutton, 1984; Garrat, 1992; Stull, 1997]. Для учета флуктуаций скорости ветра и атмосферного давления во времени в этих моделях используют разложение Рейнольдса, в котором скорости ветра и давление рассматривают как суммы средних значений этих величин за некоторый промежуток времени и их отклонений от среднего. Для решения системы уравнений используют разные способы замыкания. Большинство из них вводят дополнительные уравнения, которые выражают неизвестные величины через моменты более высокого порядка. Это обычно приводит к увеличению количества неизвестных параметров, которое можно уменьшить, лишь используя совокупность определенных дополнительных допущений, позволяющих замкнуть систему уравнений. Порядок моментов, при выводе уравнений для которых используются дополнительные допущения и уравнения, в том числе эмпирические, определяет порядок замыкания системы уравнений.

В настоящей работе представлена трехмерная модель с замыканием порядка 1,5. В основу модели положена система уравнений, характерная для так называемого семейства $k - \varepsilon$ -моделей (см. обзор [Коркодинов, 2013]). Для описания взаимодействия воздушного потока с элементами растительности на земной поверхности используем теорию контрастных структур. *Контрастной структурой* называется некоторая функция, внутри области определения которой есть интервал, где происходит резкое изменение значений этой функции. Эта область называется *внутренним переходным слоем*. Как известно, в окрестности границ раздела между двумя средами с различной кинематической вязкостью (например, на опушке леса) наблюдаются большие градиенты скорости ветра, температуры, и поэтому графики функций, описывающих эти величины, можно рассматривать как функции с внутренними переходными слоями и использовать теорию контрастных структур для моделирования этих физических величин. Расположение границ разделов сред не изменяется в течение длительного промежутка времени, поэтому интерес представляют стационарные решения краевых задач, на которых основаны модели. Преимуществом предлагаемого подхода является использование известных результатов, касающихся устойчивости стационарных решений вида контрастных структур многомерных краевых задач типа «реакция–диффузия–перенос» [Нефедов, Давыдова, 2013]. Как правило, расчеты решений таких краевых задач проводятся с использованием эволюционных численных схем «до полного установления»; при этом существование стационарного решения задачи позволяет повысить точность расчетов. Качественное сравнение представленных в настоящей статье результатов численных экспериментов согласно трехмерной модели, разработанной с использованием теории контрастных структур, с известными данными о распределении поля скорости ветра вблизи растительных неоднородностей подтверждает возможность использования предлагаемого подхода.

Описание модели

Разработанная модель является развитием двумерной модели турбулентного обмена над неоднородным растительным покровом [Левашова и др., 2015]. Она представляет собой систему из шести уравнений: трех уравнений для компонент скорости ветра, уравнений для турбулентной кинетической энергии E и скорости диссипации турбулентной кинетической энергии ε и уравнения неразрывности.

Уравнения для трех компонент скорости ветра, $u(x, y, z, t)$, $v(x, y, z, t)$, $w(x, y, z, t)$ имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\delta P)}{\partial x} - \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial w}{\partial x} \right) + 2\Omega v \sin \varphi + F_x; \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\delta P)}{\partial y} - \frac{\partial E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial w}{\partial y} \right) - 2\Omega u \sin \varphi + F_y; \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\delta P)}{\partial z} - \frac{\partial E}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_z. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь δP — усредненное отклонение давления от стандартного p_0 , определяемого гидростатическим распределением

$$\frac{dp_0}{dz} = -\rho_0 g,$$

ρ_0 — плотность воздуха, g — ускорение свободного падения, K — коэффициент турбулентной диффузии, равный по величине главным компонентам тензора турбулентной вязкости. Как правило, в $k-\varepsilon$ -моделях (см., например, [Sogachev, 2009], а также обзор [Коркодинов, 2013]) принимается допущение, что одноточечные статистические характеристики среды не зависят от горизонтальных пространственных координат, а также гипотеза об осевой симметрии тензора турбулентной вязкости в вертикальном направлении [Зилитинкевич, 1970]. При таких допущениях отличными от нуля будут только главные компоненты тензора, которые равны между собой. Функции F_x , F_y , F_z описывают силу аэродинамического трения при взаимодействии воздушного потока с элементами растительности. Слагаемые $2\Omega v \sin \varphi$ в первом уравнении (1) и $-2\Omega u \sin \varphi$ во втором описывают влияние отклоняющей силы вращения Земли на движение некоторого объема воздуха (сила Кориолиса); здесь Ω — угловая скорость вращения земли, φ — географическая широта. Влияние кинематической вязкости на распределение поля скорости ветра пренебрежимо мало и поэтому не учитывается в уравнениях (1).

С учетом сделанных допущений уравнения для величин E и ε имеют вид (см. обзор [Коркодинов, 2013])

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} + v \frac{\partial E}{\partial y} + w \frac{\partial E}{\partial z} &= P - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\sigma_E} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K}{\sigma_E} \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K}{\sigma_E} \frac{\partial E}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= \frac{C_{1\varepsilon} P - C_{2\varepsilon} \varepsilon}{E} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где P — слагаемое, описывающее генерацию турбулентной кинетической энергии, которая выражается через компоненты скорости ветра следующим образом:

$$P = 2K \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) + K \left(\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right).$$

Значения параметров в уравнениях принимаются в соответствии с [Коркодинов, 2013]: $\sigma_E = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $C_{1\varepsilon} = 0,52$, $C_{2\varepsilon} = 0,8$. Уравнение неразрывности в случае, когда плотность воздуха можно считать постоянной, записывается как

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Для замыкания системы уравнений (1)–(3) в модели используется дополнительное условие, связывающее коэффициент турбулентной диффузии со значениями E и ε :

$$K = C_\mu E^2 \varepsilon^{-1}, \quad (4)$$

где $C_\mu = 0,09$ — безразмерный коэффициент пропорциональности (см. обзор [Коркодинов, 2013]). Система уравнений (1)–(3) решается в некоторой замкнутой области пространства, представляющей собой прямоугольный параллелепипед:

$$\Pi = \{-a \leq x \leq a, -a \leq y \leq a, 0 \leq z \leq b\}. \quad (5)$$

Предполагается, что вне рассматриваемой области отсутствуют внешние источники или стоки энергии и вещества, оказывающие влияние на рассматриваемый объект. Таким образом, можно принять условие, что потоки массы и энергии через грани параллелепипеда равны нулю, откуда следует, что производные функций E , ε и δP по направлению нормали к граням параллелепипеда также равны нулю:

$$\left. \frac{\partial E}{\partial n} \right|_{\substack{x = \pm a, \\ y = \pm a, \\ z = b, z = 0}} = 0; \quad \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} \right|_{\substack{x = \pm a, \\ y = \pm a, \\ z = b, z = 0}} = 0; \quad \left. \frac{\partial(\delta P)}{\partial n} \right|_{\substack{x = \pm a, \\ y = \pm a, \\ z = b, z = 0}} = 0. \quad (6)$$

Такие же условия задаются и для компонент вектора скорости — функций u , v , w — на верхней и боковой гранях параллелепипеда:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial n} \right|_{\substack{x = \pm a, \\ y = \pm a, \\ z = b}} = 0; \quad \left. \frac{\partial v}{\partial n} \right|_{\substack{x = \pm a, \\ y = \pm a, \\ z = b}} = 0; \quad \left. \frac{\partial w}{\partial n} \right|_{\substack{x = \pm a, \\ y = \pm a, \\ z = b}} = 0. \quad (7)$$

На нижней границе моделируемой области для компонент скорости ветра задаются условия прилипания:

$$u|_{z=0} = v|_{z=0} = w|_{z=0}. \quad (8)$$

Для описания структуры растительности используются данные о плотности и высоте древостоя, средней высоте крепления крон и вертикальном распределении фотосинтезирующей фитомассы, определяемом плотностью листовой поверхности, $LAD(x, y, z)$.

Модельные эксперименты проводили для участка леса со сплошной вырубкой шириной 80 метров. Горизонтальное сечение вырубки имеет форму квадрата со стороной L , углы квадрата закруглены. Высота окружающего вырубку леса принята равной $H_0 = 30$ м, что соответствует спелому еловому лесу, выросшему на хорошо дренированной почве. Высота крепления крон деревьев принята равной 15 м. Было также сделано предположение, что внутри древостоя отсутствует подрост. На рис. 1 представлены графические изображения сечения вырубки

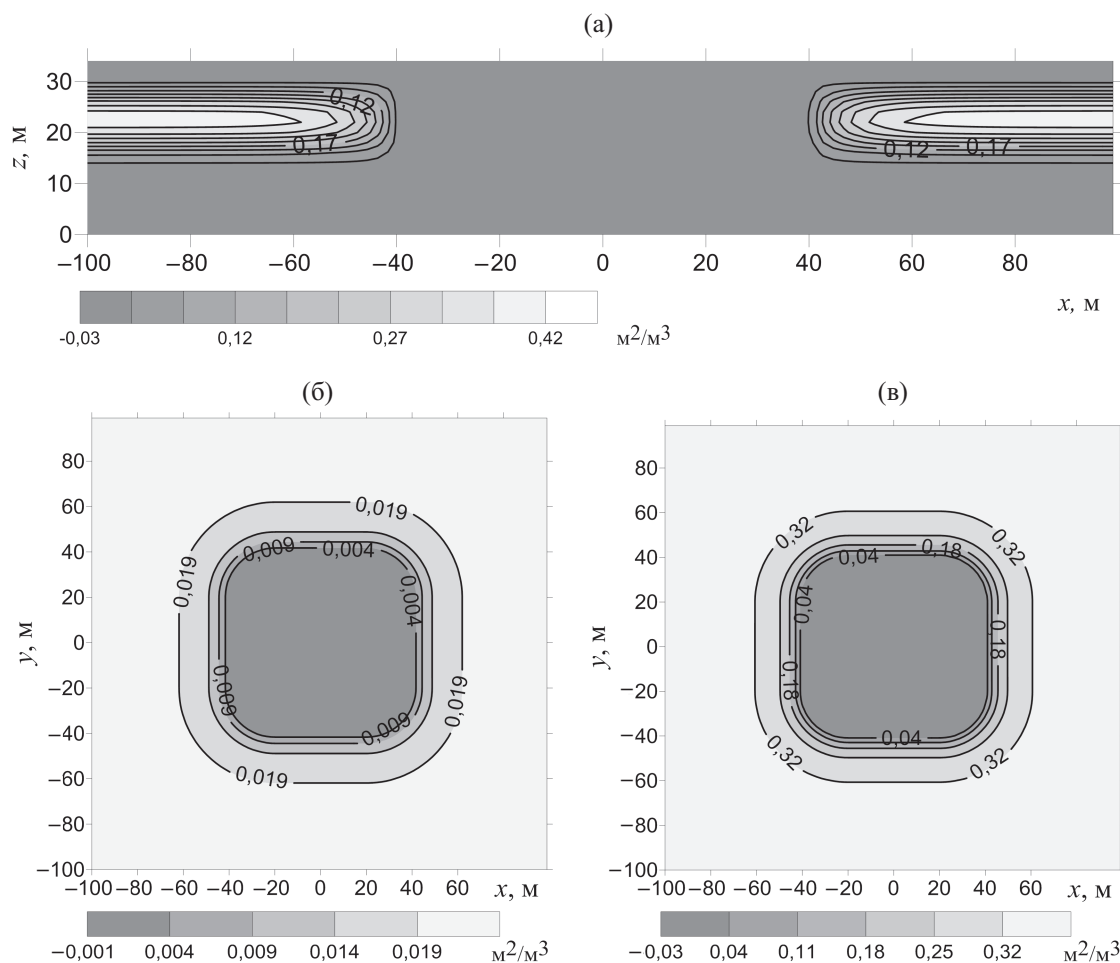


Рис. 1. Распределение LAD : а) вдоль плоскости, проведенной через центральную часть вырубki; б, в) горизонтальное распределение LAD в древостое вокруг исследуемой вырубki: на высоте 10 м, на высоте 20 м соответственно

вертикальной плоскостью, проведенной через центральную часть вырубki, и сечений вырубki горизонтальными плоскостями при $z = 10$ м и $z = 20$ м.

Функцию, описывающую плотность листовой поверхности, выбирали следующим образом:

$$LAD = c_d \cdot h(z) \cdot l(r),$$

где c_d — безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления элементов растительности воздушному потоку (в настоящей работе величина c_d принята равной 0,4), функции $h(z)$ и $l(r)$ имеют вид

$$h(z) = \max(e^{-(z-H_1)(z-H_2)} - 0,5; 0) + \max(0,05 - e^{-10(z-H_0)}; 0), \quad l(r) = \max(1 - e^{-r}; 0),$$

$H_1 = 18$ м, $H_2 = 27$ м, $|r(x, y)|$ — расстояние от границы вырубki вдоль нормали к ней, причем $r > 0$ вдоль нормали, направленной внутрь леса, а $r < 0$ вдоль нормали, направленной в области вырубki.

Система уравнений (1)–(3) с граничными условиями (6)–(8) решается как задача на установление. В начальный момент времени задаются следующие условия:

$$u|_{t=0} = u_{\text{open}}(z) \cdot (1 - LAD); \quad v|_{t=0} = w|_{t=0} = 0; \quad \delta P|_{t=0} = 0; \quad E|_{t=0} = E_0; \quad \varepsilon|_{t=0} = \varepsilon_0,$$

константы E_0 и ε_0 подбираются таким образом, чтобы коэффициент турбулентной диффузии K , определяемый выражением (4), в начальный момент времени был равен 1. Функция u_{open} задает распределение скорости ветра над земной поверхностью, покрытой низкой травой, вдали от границ раздела между растительными сообществами с разной структурой. Для поверхности с низкой травой она задается как [Дубов и др., 1978]

$$u_{\text{open}} = u_* \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z + z_g}{z_g}, \quad (9)$$

где u_* — динамическая скорость, принимаемая в первом приближении равной 0,3 м/с; $\kappa = 0,4$ — постоянная Кармана, $z_g = 0,1$ м — параметр шероховатости травы.

Выбор функции, описывающей взаимодействие воздушного потока с растительностью

Для описания процесса взаимодействия воздушного потока с элементами растительности в настоящей модели использована теория контрастных структур по аналогии с активными средами, рассматриваемыми в биофизике [Васильев и др., 1987]. Активная среда характеризуется физическими величинами, называемыми *возбудимыми элементами*. Часть возбудимых элементов, описывающих активную среду, обладают свойством мультистабильности, что означает возможность для соответствующей физической величины принимать одно из значений, определяемых заданными внешними факторами, в течение продолжительного времени, т. е. находиться в стабильном состоянии. Изменение стабильного состояния физической величины происходит в результате внешнего воздействия или за счет пространственной неоднородности. В результате изменения состояния мультистабильного элемента образуется область с большим градиентом описывающей его функции, а график этой функции имеет внутренний переходный слой. В пространственно неоднородных диссипативных средах возможно образование переходных слоев, области локализации которых не изменяются со временем. Моностабильные элементы активной среды могут быть выведены из состояния равновесия за счет прямых и обратных связей с мультистабильными элементами или друг с другом.

В ходе разработки настоящей модели было сделано предположение, что система уравнений (1)–(3) описывает активную среду. Мультистабильным элементом является горизонтальная составляющая скорости ветра вдоль направления воздушного потока в случае отсутствия растительности. Будем считать, что это u -компонента скорости ветра (составляющая скорости ветра вдоль оси x). При определенных физических условиях эта величина имеет два стабильных состояния: u_{open} — скорость ветра на открытой местности; u_{forest} — скорость ветра внутри области с лесной растительностью, оказывающей сопротивление воздушному потоку и расположенной на достаточном удалении от опушки леса. Остальные неизвестные величины в системе (1)–(3) играют роль моностабильных элементов и имеют стабильное нулевое состояние. Уравнение неразрывности играет роль обратной связи между компонентами скорости ветра, а величины E и ε связаны со скоростью ветра посредством уравнений (2).

Как правило, мультистабильные элементы с двумя устойчивыми состояниями описываются при помощи уравнения параболического типа с кубической нелинейностью [Зельдович, Франк-Каменецкий, 1938]. Кроме того, в работе [Нефедов, Давыдова, 2013] получены условия, при которых в неоднородной среде возможно образование переходных слоев, положение которых не изменяется со временем. Исходя из этих соображений, в уравнении (1) для u -компоненты скорости ветра функцию F_x выбрали следующим образом:

$$F_x(u, x, y, z) = \frac{1}{u_*} \cdot LAD \cdot (u - u_{\text{open}})(u - \varphi(x, y, z))(u - u_{\text{forest}}),$$

множитель $1/u_*$ выбран из соображений размерности. Вдали от границ раздела между растительными сообществами с разной структурой горизонтальная компонента скорости u_{open} определяется согласно выражению (9). Поле скорости ветра над высокой растительностью, такой как лес, а также внутри него описывается с помощью кусочно-непрерывной функции [Cionco, 1965]

$$u_{\text{forest}} = \begin{cases} u_h(H_0) \cdot \exp\left(\alpha\left(\frac{z}{H_0} - 1\right)\right), & z < H_0, \\ u_h(z), & z \geq H_0, \end{cases}$$

где $u_h(z) = u_* \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z - d_f}{z_f}$, $z_f = 1 \div 1,5$ м — значение параметра шероховатости для леса без подроста высотой около 30 метров, полученное по результатам расчетов с помощью модели, предложенной Раупахом [Raupach, 1994]; d_f — высота слоя вытеснения для леса, которая рассчитывается согласно уравнению [Raupach et al., 1991]

$$1 - \frac{d}{H_0} = \frac{1}{\sqrt{7,5 \cdot LAI}} \left(1 - \exp\left(-\sqrt{7,5 \cdot LAI}\right)\right),$$

$\alpha = H_0 \cdot LAD/c_d$. Безразмерный параметр LAI (leaf area index), определяемый как отношение суммарной площади поверхности листьев растений (односторонней), произрастающих на некоторой

площади земной поверхности, к площади этой поверхности, вычисляется как $LAI = \int_0^{H_0} LAD \, dz$.

Функция $\varphi(x, y, z)$ подбирается таким образом, чтобы для первого уравнения (1) выполнялись условия существования стационарного решения, указанные в работе [Нефедов, Давыдова, 2013]. В частности, этим требованиям отвечает зависимость следующего вида:

$$\varphi(x, y, z) = A \cdot LAD \cdot (u_{\text{open}} + u_{\text{forest}}) \cdot e^{-B(z-H_0/C)}.$$

Коэффициенты A , B и C подбираются в ходе численных экспериментов таким образом, чтобы вблизи верхней границы леса внутренний переходный слой графика функции, описывающей u -компоненту скорости ветра, был расположен на уровне крон деревьев. В настоящей работе принято $A = 1,2$, $B = 0,5$, $C = 3$.

Функции F_y и F_z выражаем как силу аэродинамического трения [Дубов и др., 1978]:

$$F_y(u, v, w, x, y, z) = -LAD \cdot v \cdot \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}, \quad F_z(u, v, w, x, y, z) = -LAD \cdot w \cdot \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}.$$

Описание численных экспериментов

Модельные эксперименты включали проведение расчетов трехмерного поля скорости ветра и параметров турбулентного обмена в пределах сплошной вырубki, а также внутри окружающего вырубку древостоя и над ним. Для проведения численных экспериментов систему уравнений (1)–(3) приводили к безразмерному виду. Масштаб скорости — динамическая скорость. Значение динамической скорости над растительным покровом принимали равным $u_* = 0,3$ м/с. Масштаб длины — длина Монино–Обухова, $L \approx 7,3$ м. Масштаб времени определяли как $t_* = L/u_* \approx 24,3$ с.

Систему уравнений решали относительно безразмерных величин u/u_* , v/u_* , w/u_* , $E/(u_*)^2$, $\varepsilon L/(u_*)^3$ и $\delta P/(\rho_0(u_*)^2)$. В расчетной области (5) вводили равномерную сетку. Для решения параболической системы уравнений (1)–(3) применяли метод эволюционной факторизации [Калиткин, Корякин 2013]. Для учета уравнения неразрывности использовали метод расщепления по

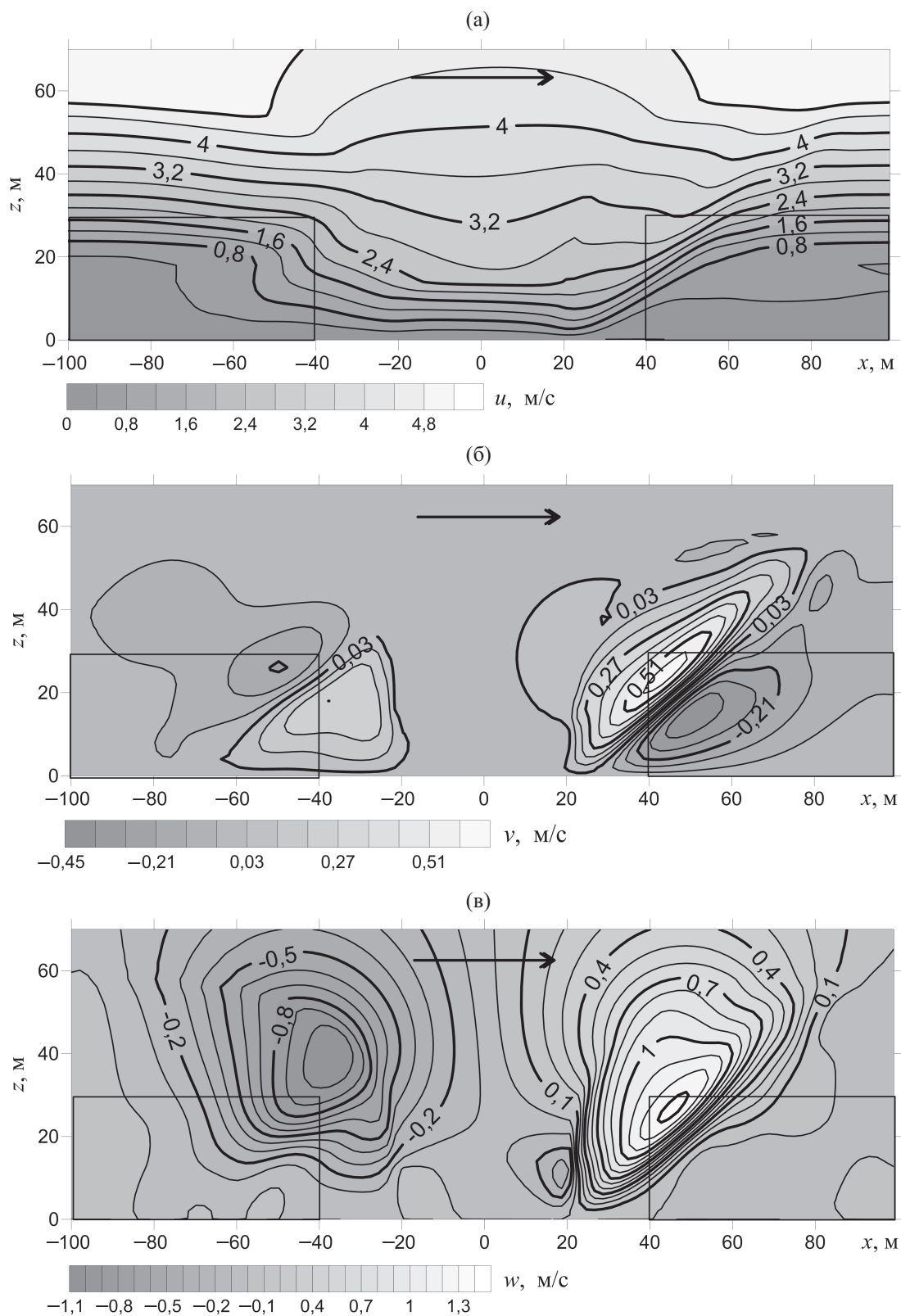


Рис. 2. Распределение компонент скорости ветра в вертикальной плоскости, проведенной через центр вырубki: а) u -компонента; б) v -компонента; в) w -компонента. Направление ветра указано стрелкой

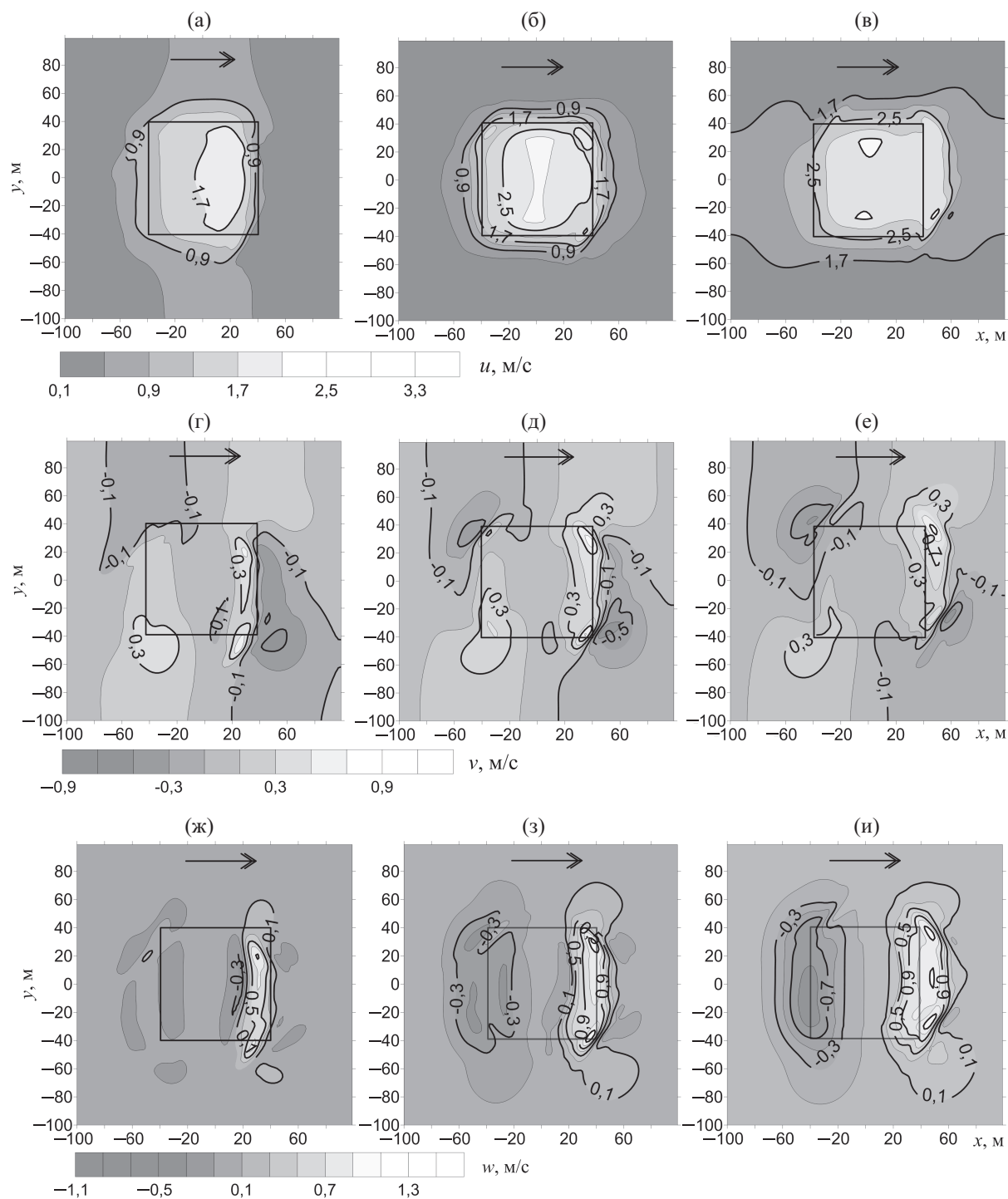


Рис. 3. Горизонтальное распределение компонент скорости ветра: а) распределение u -компоненты в подкroновом пространстве, $z = 10$ м; б) распределение u -компоненты в кронах, $z = 20$ м; в) распределение u -компоненты на верхней границе леса, $z = 30$ м; г) распределение v -компоненты в подкroновом пространстве, $z = 10$ м; д) распределение v -компоненты в кронах, $z = 20$ м; е) распределение v -компоненты на верхней границе леса; ж) распределение w -компоненты в подкroновом пространстве, $z = 10$ м; з) распределение w -компоненты в кронах, $z = 20$ м; и) распределение w -компоненты на верхней границе леса, $z = 30$ м. Направление ветра указано стрелкой

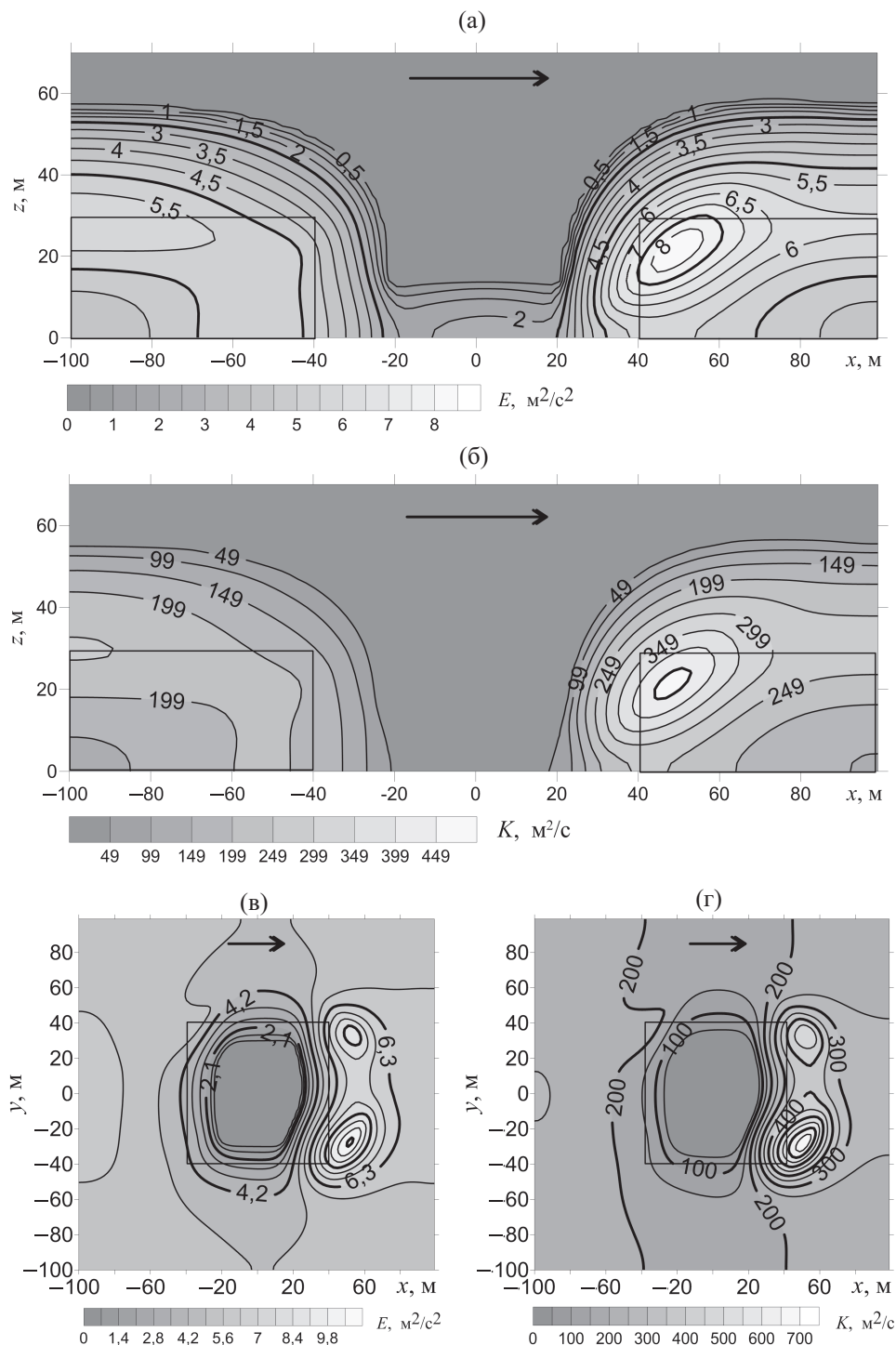


Рис. 4. Вертикальное и горизонтальное распределения турбулентной кинетической энергии E и коэффициента турбулентной диффузии K . Распределение E (а) и K (б) в вертикальной плоскости, проведенной через центр вырубki. Распределение E (в) и K (г) в горизонтальной плоскости, проведенной по верхней границе леса на высоте $z = 30$ м

физическим процессам [Мордвинов, 2009]. Согласно этому методу расчет на каждом временном слое осуществляется в два этапа. На первом этапе проводится учет диффузии и переноса; на втором происходит адаптация полей скорости ветра за счет избыточного давления δP . В ходе модельных экспериментов предполагали также нейтральность атмосферной стратификации приземного слоя воздуха.

Результаты модельных расчетов

Результаты проведенных численных экспериментов демонстрируют существенное влияние, которое оказывает сплошная вырубка на поле скорости ветра внутри и над растительным покровом (рис. 2 и 3). Расчеты показали: наличие хорошо выраженной асимметрии в распределении горизонтальной составляющей поля скорости ветра, параллельной движущемуся потоку (u), на наветренных и подветренных участках вырубки (рис. 3, *a–в*); присутствие хорошо выраженных циркуляционных токов воздуха на участке вырубки вблизи подветренного участка леса (рис. 2, *в*); наличие значительных восходящих токов воздуха вблизи наветренного участка леса (рис. 2, *в*); увеличение коэффициентов турбулентности и кинетической энергии на наветренной части вырубки, достигающее максимальных значений в средней и верхней частях крон деревьев (рис. 4, *a, б*); наличие асимметрии в полях горизонтальной составляющей скорости ветра и составляющей скорости ветра, перпендикулярной набегающему на участок леса с вырубкой воздушному потоку (v), а также асимметрии в полях коэффициента турбулентного обмена и турбулентной кинетической энергии (рис. 4, *в*). Данная закономерность, очевидно, обусловлена влиянием на движущийся воздушный поток силы Кориолиса.

Выявленные максимальные значения турбулентной кинетической энергии на наветренных участках вырубки являются важным индикатором динамической нагрузки, создаваемой воздушным потоком, на деревья. Превышение допустимых нагрузок при сильном шквалистом ветре может привести к вывалу или ветролому части деревьев на наветренной части опушки.

Полученные результаты по оценке влияния сплошной вырубки на поле ветра и режим турбулентности в целом довольно хорошо согласуются как с результатами выполненных ранее численных экспериментов с применением альтернативных модельных подходов [Мухартова и др., 2015; Cassiani, 2008; Olchev et al., 2009], так и с данными лабораторных исследований турбулентности в ветровом туннеле [Marshall, 1998] и с прямыми измерениями составляющих поля ветра и коэффициентов турбулентного обмена в полевых условиях [Бызова и др., 1989; Бызова и др., 1991; Davies-Colley et al., 2000; Morse et al., 2002; Kochendorfer, Paw, 2011].

Заключение

Расчеты поля скорости ветра и режима турбулентности, проведенные с помощью разработанной трехмерной гидродинамической модели для сплошной вырубки, показали существенное влияние неоднородной структуры растительности на процессы турбулентного обмена в приземном слое атмосферы. Учет отклоняющей силы вращения Земли позволил выявить существенную асимметрию в распределении поля скорости ветра внутри растительного покрова и над ним относительно основного направления скорости ветра. Разработанная модель может найти широкое применение в лесном хозяйстве в качестве инструмента для прогноза ветрового режима в неоднородном растительном покрове с мозаичной структурой и оценки рисков возникновения ветровалов после проведения лесозаготовительных мероприятий.

Список литературы

- Бызова Н. Л., Иванов В. Н., Гаргер Е. К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 263 с.
- Бызова Н. Л., Иванов В. Н., Гаргер Е. К. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 279 с.
- Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы. — М.: Наука, 1987. — 240 с.
- Дубов А. С., Быкова Л. П., Марунич С. В. Турбулентность в растительном покрове. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 183 с.
- Зельдович Я. Б., Франк-Каменецкий Д. А. Теория теплового распространения пламени // Журнал физической химии. — 1938. — Т. 12. — С. 100–105.
- Зилитинкевич С. С. Динамика пограничного слоя атмосферы. — Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1970. — 292 с.
- Калиткин Н. Н., Корякин П. В. Численные методы. В двух книгах. Книга 2. Методы математической физики. — М.: Издательский центр «Академия», 2013. — 303 с.
- Коркодинов Я. А. Обзор семейства $k - \varepsilon$ -моделей для моделирования турбулентности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. — 2013. — № 2. — С. 5–16.
- Левашова Н. Т., Мухартова Ю. В., Давыдова М. А., Шапкина Н. Е., Ольчев А. В. Применение теории контрастных структур для описания поля скорости ветра в пространственно неоднородном растительном покрове // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. — 2015. — № 3. — С. 3–10.
- Мордвинов В. И. Численные методы анализа и прогноза погоды. — Иркутск: Издательство Иркутского государственного университета, 2009. — 144 с.
- Мухартова Ю. В., Левашова Н. Т., Ольчев А. В., Шапкина Н. Е. Применение двумерной модели для описания турбулентного переноса CO_2 в пространственно-неоднородном растительном покрове // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. — 2015. — № 1. — С. 15–22.
- Нефедов Н. Н., Давыдова М. А. Контрастные структуры в сингулярно возмущенных квазилинейных уравнениях «реакция–диффузия–адвекция» // Дифференц. уравнения. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 715–733.
- Cassiani M., Katul G. G., Albertson J. D. The effects of canopy leaf area index on airflow across forest edges: large-eddy simulation and analytical results // Boundary-Layer Meteorol., 2008. — Vol. 126, Issue 3. — P. 433–460.
- Cionco R. M. A mathematical model for air flow in a vegetative canopy // J. of Appl. Meteorol. — 1965. — Vol. 4, No. 6. — P. 517–522.
- Davies-Colley R. J., Payne G. W., van Elswijk M. Microclimate gradients across a forest edge // New Zealand Journal of Ecology. — 2000. — Vol. 24, No. 23. — P. 111–121.
- Garrat J. R. The Atmospheric Boundary Layer. — Cambridge Univ Press, 1992. — 316 p.
- Kochendorfer J., Kyaw Tha Paw U. Field estimates of scalar advection across a canopy edge // Agricultural and Forest Meteorol. — 2011. — Vol. 151, Issue 5. — P. 585–594.
- Marshall B. J. Wind Flow Structures and Wind Forces in Forests. — University of Oxford, 1998. — Ph.D. Thesis, 193 p.
- Morse A. P., Gardiner B. A., Marshall B. J. Mechanisms controlling turbulence development across a forest edge // Boundary-Layer Meteorol. — 2002. — Vol. 103, Issue 2. — P. 227–251.
- Olchev A., Radler K., Sogachev A., Panferov O., Gravenhorst G. Application of a three-dimensional model for assessing effects of small clear-cuttings on radiation and soil temperature // Ecological Modelling. — 2009. — Vol. 220. — P. 3046–3056.

- Panofsky H. A., Dutton J. A.* Atmospheric Turbulence. — New York: Wiley, 1984. — 397 p.
- Raupach M. R., Antonia R. A., Rajagopalan S.* Rough wall turbulent boundary layers // Applied Mechanics Reviews. — 1991. — Vol. 44, No. 6. — P. 1–25.
- Raupach M. R.* Simplified expressions for vegetation roughness length and zeroplane displacement as functions of canopy height and area index // Boundary Layer Meteorol. — 1994. — Vol. 71, No. 6. — P. 211–216.
- Sogachev A.* A note on two-equation closure modelling of canopy flow // Boundary-Layer Meteorol. — 2009. — Vol. 130, Issue 3. — P. 423–436.
- Stull R. B.* An Introduction to Boundary Layer Meteorology. — Boston: Kluwer Academic Publ., 1997. — 442 p.