

УДК 519.6:551.588.74

Математическое моделирование климато-экологических процессов урбанизированных территорий

В.В. Пененко, Е.А. Цветова*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6*

Поступила в редакцию 23.01.2017 г.

Обсуждаются вопросы создания системы моделирования для исследования климато-экологических проблем урбанизированных территорий, подвергающихся природным и антропогенным воздействиям. Рассматриваются типичные задачи: формирование мезоклиматов и качества атмосферы городских агломераций на фоне глобальных процессов в условиях конкретных регионов. Для решения прямых и обратных задач этого класса используются модели гидротермодинамики, модели переноса и трансформации различных субстанций в газовом и аэрозольном состояниях. Технология моделирования строится на основе вариационных принципов с использованием концепции сопряженных интегрирующих множителей. Это обеспечивает согласованное объединение всех моделей, построение численных схем и оперативное усвоение данных наблюдений от различных средств мониторинга. Предложен новый алгоритм реализации модели параметризации процессов вертикального турбулентного обмена при произвольной стратификации атмосферы. Приведены результаты сценариев формирования типичных мезоклиматов и распространения примесей в атмосфере Новосибирской городской агломерации.

Ключевые слова: вариационный принцип, модели гидродинамики и химии атмосферы, усвоение данных, параметризация вертикальной турбулентности, мезоклиматы, перенос примесей, городская агломерация, Новосибирск; *variational principle, model of hydrodynamics and chemistry of the atmosphere, data assimilation, parameterization of vertical turbulence, mesoclimate, air pollution, urban area, Novosibirsk.*

Введение

Обеспечение приемлемого качества природной среды для проживания каждого жителя планеты — это задача особой важности, поэтому проблемы окружающей среды всегда были и останутся в приоритете, особенно в больших городах, где сосредоточены индустриальные объекты, развит местный транспорт и компактно проживает население [1–11]. В сибирских городах, находящихся в суровых климатических условиях, есть своя специфика сочетания климатических, погодных и антропогенных факторов, приводящих порой к катастрофическим последствиям.

В проблемах оценок качества городской окружающей среды выделяются два типа задач, относящихся к срокам прогнозирования: краткосрочные и долгосрочные. Краткосрочные обычно связывают с прогнозом погоды, и на его фоне предсказывают возможные изменения качества атмосферы. Долгосрочное прогнозирование требуется при проектировании строительства новых объектов, которые могут изменить уже сложившуюся ситуацию в городе или регионе. Поскольку промышленные объекты обычно проектируются на длинный жизненный цикл, такие исследования тяготеют к климатическим масштабам.

Концепция природоохранного прогнозирования и проектирования, разрабатываемая в ИВМиГ СО РАН [10, 11], предназначена для решения широкого круга взаимосвязанных задач окружающей среды и климата, в том числе для задач изучения изменчивости атмосферных условий городских агломераций. Основу концепции составляют вариационный подход, опирающийся на модели динамики атмосферы, модели переноса и трансформации загрязняющих примесей, а также на данные наблюдений о реальном поведении атмосферы. В частности, в рамках концепции возможно решение следующих прикладных задач, имеющих непосредственное отношение к городским проблемам: моделирование мезоклиматов в условиях сложного рельефа и разнородных характеристик подстилающей поверхности; моделирование процессов переноса и трансформации многокомпонентных примесей в газовом и аэрозольном состояниях; оценка возможности появления вторичных продуктов загрязнения в различных метеорологических ситуациях; районирование рассматриваемых территорий по уровням опасности антропогенных воздействий; усвоение данных наблюдений о концентрациях примесей и др. Очевидно, что подобные задачи могут рассматриваться на различных временных интервалах. Отличие состоит в методиках получения результатов, выборе параметров и параметризаций, а также наборов входных данных, соответствующих постановке задачи.

* Владимир Викторович Пененко (penenko@sscc.ru);
Елена Александровна Цветова (e.tsvetova@ommgr.sccc.ru).

Описание моделей

Задачи прогнозирования погоды и качества атмосферы, с математической точки зрения, формулируются как задачи исследования нелинейных динамических систем, описывающих процессы гидротермодинамики атмосферы с учетом микрофизики гидрологического цикла совместно с процессами переноса и трансформации многокомпонентных примесей в газовом и аэрозольном состояниях. Специфическая черта изучаемых процессов состоит в их разномасштабности. Кроме того, модели природных процессов и модели наблюдений за их поведением содержат различного рода неопределенности, как в физическом описании самих моделей, так и во входных данных и действующих факторах, которые необходимо оценивать с использованием всей доступной фактической информации.

Для этих целей мы используем комплекс математических моделей для решения совместных задач гидротермодинамики и химии атмосферы. Структуру этих моделей компактно можно представить в операторном виде:

$$L(\Phi, \mathbf{Y}, \mathbf{r}) \equiv \frac{\partial \Phi}{\partial t} + G(\Phi, \mathbf{Y}) - \mathbf{f} - \mathbf{r} = 0; \quad (1)$$

$$\Phi^0 = \Phi_a^0 + \xi. \quad (2)$$

Здесь $\Phi(\mathbf{x}, t) = (\Phi_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n})$ — вектор-функции состояния, принадлежащие вещественному пространству $Q(D_t)$, $D_t = D \times [0, \bar{t}] \in R^4$, $D \in R^3$ — область изменения пространственных координат $\mathbf{x} = (x, y, z)$, ось x направлена на восток, ось y — на север, ось z — вверх по нормали к плоскости xy ; $\Omega_t = \Omega \times [0, \bar{t}]$, Ω_t, Ω — границы областей D_t , D соответственно, $[0, \bar{t}]$ — интервал изменения времени. Область D представляет ограниченную часть глобальной системы Земли. В состав нелинейного оператора модели $G(\Phi, \mathbf{Y})$ входят дифференциальные и интегродифференциальные составляющие, \mathbf{Y} — вектор параметров модели, принадлежащий области допустимых значений $R(D_t)$; \mathbf{f} — функции источников; Φ^0 — начальное состояние при $t = 0$, а Φ_a^0 — его априорная оценка; \mathbf{r}, ξ — подлежащие определению функции, представляющие в обобщенном виде неопределенности и ошибки соответствующих объектов. Поскольку в реальных ситуациях мы имеем дело как с прямыми, так и с обратными задачами, то отнесение объектов к параметрам для задач данного класса достаточно условно. Поэтому функции источников и функции, входящие в граничные и начальные условия, удобно отнести к ряду параметров системы моделирования. Имеющиеся априорные оценки вектора \mathbf{Y} обозначим как $\mathbf{Y}_a \in R(D_t)$.

В соответствии со структурой объединенных моделей динамики и химии функции состояния $\Phi(\mathbf{x}, t)$ представим в блочном виде с тремя составляющими:

$$\Phi(\mathbf{x}, t) = \{\Phi_i, i = \overline{1, n}\} = (\Phi_{hT}, \Phi_w, \Phi_c),$$

где n — общее число переменных состояния;

$$\Phi_{hT} = (\mathbf{u} = (u, v, w), T, \rho, p) \equiv \{\Phi_i, i = \overline{1, 6}\}$$

— переменные гидродинамического блока: \mathbf{u} — вектор скорости с компонентами u, v, w в направлениях координат x, y, z соответственно; T, ρ, p — температура, плотность, давление;

$$\Phi_w = (q_v, q_c, q_r, q_l, q_f) \equiv \{\Phi_i, i = \overline{7, 11}\}$$

— категории влаги в гидрологическом цикле атмосферы: q_v, q_c, q_r — водяной пар, облачная вода, дождь; $q_l = q_c + q_v$ — вода в жидкой фазе; q_f — вода в твердой фазе (лед, снег);

$$\Phi_c = \{\Phi_i, i = \overline{12, n}\}$$

— совокупность субстанций в газовом и аэрозольном состояниях.

Для конкретизации представления общей идеи вариационного подхода запишем следующую систему уравнений из структуры (1), (2) [12]:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div} \rho u \mathbf{u} - M(u) + \frac{\partial p}{\partial x} - \rho(lv - kw) - (f_u + r_u) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div} \rho v \mathbf{u} - M(v) + \frac{\partial p}{\partial y} + \rho lu - (f_v + r_v) = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div} \rho w \mathbf{u} - M(w) + \frac{\partial p}{\partial z} + g\rho - \rho ku - (f_w + r_w) = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \text{div} \rho T \mathbf{u} + A_T \rho T \text{div} \mathbf{u} - \kappa M(T) - \kappa(f_T + r_T) = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho p}{\partial t} + \text{div} \rho p \mathbf{u} + \kappa \rho p \text{div} \mathbf{u} - (\kappa - 1)M(p) - (\kappa - 1)(f_p + r_p) = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho \Phi_i}{\partial t} + \text{div} \rho \Phi_i \mathbf{u} - M(\Phi_i) + \rho S_i(\Phi) - (f_{\Phi_i} + r_{\Phi_i}) = 0, \quad (8)$$

$$i = \overline{7, n},$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div} \rho \mathbf{u} = 0; \quad (9)$$

$$p = \rho R_d(1 + \alpha)T; \quad \alpha = (R_v/R_d - 1)q_v - q_l - q_f; \quad (10)$$

$$M(\Phi) = \text{div} \mu_\Phi \text{grad}(\rho \Phi), \quad A_T = \kappa R_d(1 + \alpha)/c_p;$$

$$\kappa = c_p/c_v.$$

Здесь k, l — параметры Кориолиса; g — ускорение силы тяжести; R_d, R_v — газовые постоянные для сухого воздуха и водяного пара соответственно; функция α описывает вклад влажности в определение виртуальной температуры $T_v = (1 + \alpha)T$; c_p — удельная теплоемкость сухого воздуха при посто-

янном давлении; c_v — удельная теплоемкость влажного воздуха при постоянном объеме; операторы $M(\varphi)$ описывают процессы турбулентного обмена; μ_φ — диагональный тензор коэффициентов турбулентности. Уравнения (8) представляют систему уравнений переноса и трансформации многокомпонентных субстанций в газовом и аэрозольном состояниях и систему уравнений для категорий влаги в гидрологическом цикле. Оператор $S_i(\varphi)$ описывает механизмы трансформации субстанций. Уравнение притока тепла (6) и уравнение для давления (7) построены с учетом первого начала термодинамики, уравнения неразрывности (9) и состояния (10). Этот вариант модели приспособлен для изучения негидростатических процессов в природоохранных задачах с интенсивными источниками воздействий. Краевые условия для замыкания моделей зависят от конкретных постановок задач и включаются в определение класса функций $Q(D_t)$. Все объекты в системе (кроме констант) зависят от пространственных координат и времени.

Заметим, что система уравнений (3)–(9) формально переопределена. Такая постановка специально используется, чтобы иметь возможность выбора более гибкого способа решения задачи в вариационном подходе. Функции ρ , $\sqrt{\rho}$ и уравнение (9) используются, при необходимости, в целях преобразования операторов конвекции к кососимметрическому виду во всех уравнениях геофизической гидротермодинамики и переноса примесей ([3], с. 18–22). Что касается уравнения (7), то оно используется для построения безытерационных алгоритмов нахождения давления. В нашем случае остается построить согласованные аппроксимации, приводящие к единственному решению задачи, что мы и делаем в процессе решения.

Фундаментальный элемент в природоохранном прогнозировании — данные измерений реального поведения исследуемых процессов. Мы включаем их в технологию моделирования с помощью соотношений вида

$$\psi_k = H_k(\varphi) + \eta_k, \quad k = \overline{1, K}, \quad (11)$$

где $\psi = \{\psi_k\} \in \Psi(D_t^m)$ — набор измеряемых величин, Ψ — «пространство измерений»; K — количество различных видов наблюдений; $H(\varphi) = \{H_k(\varphi)\}$ — совокупность моделей наблюдений; $\eta = \{\eta_k\}$ — функции, которые вводятся для учета неопределенностей как в представлении самих моделей наблюдений, так и в данных измерений. Результаты наблюдений определены в области $D_t^m \subset D_t$. Модели наблюдений осуществляют операции преобразования информации, рассчитанной по результатам моделирования функций состояния моделей процессов $\varphi \in Q(D_t)$, к объектам $\psi = \{\psi_k\}$ из пространства измерений $\Psi(D_t^m)$.

Необходимый компонент в нашем подходе — это целевые функционалы, которые отражают суть конкретного исследования, иначе говоря, его цель.

Например, функционал для усвоения данных наблюдений, выражающий количественную оценку точности и качества системы моделирования:

$$J(\varphi) = (\eta^T W \eta), \quad \eta = \psi - H(\varphi). \quad (12)$$

Он определяет меру отклонений между результатами моделирования $\{\varphi\}$ и данными мониторинга $\{\psi\}$. Здесь W — диагональная весовая матрица блочной структуры с неотрицательными элементами. Другими примерами могут быть функционалы по управлению качеством атмосферы, оценок экологических рисков, обнаружению источников загрязнения и т.д.

Вариационный принцип

Суть вариационного подхода состоит в формулировке вариационного принципа, который объединяет все элементы системы моделирования: модели, данные, целевые функционалы и т.д. Вариационный принцип мы формулируем в «слабом» смысле: в уравнениях (1)–(10) присутствуют неопределенности r , которые допускают некоторый «люфт» в формулировках моделей, что дает возможность подстраивать получающиеся решения по мере усвоения поступающей информации (11), в том числе и с помощью решения обратных задач. Поэтому в вариационном принципе при минимизации функционала (12) математические модели (1)–(10) выступают в качестве ограничений на классы функций состояния, параметров, функций неопределенностей и входных данных моделей процессов. Для их учета в рамках вариационного принципа используются сопряженные функции в роли распределенных множителей Лагранжа [12].

Для объединения данных с моделями процессов разработаны специальные вариационные методы усвоения данных. В оперативных условиях приемлемое решение этой проблемы предоставляют прямые безытерационные методы усвоения данных в реальном времени [13].

Главное, чего мы хотим достичь применением вариационного подхода, — это построить реализацию комплекса разномасштабных моделей так, чтобы получить согласованные и достаточно точные алгоритмы для вычисления функций состояния, сопряженных функций и функций неопределенностей моделей, обеспечивающие выполнение основных законов сохранения, присущие математическим моделям. Мы предложили использовать также в рамках вариационного подхода концепцию сопряженных интегрирующих множителей для построения дискретно-аналитических схем для уравнений типа конвекции–диффузии–реакции, составляющих основу системы (1)–(10). Конкретные схемы реализации соответствующих алгоритмов можно найти в [14, 15]. Ниже представлен еще один алгоритм, реализующий в таком же контексте модель подсерийной турбулентности.

Монотонный алгоритм для модели параметризации турбулентного обмена с учетом переменной стратификации атмосферы

Параметризация подсеточных масштабов — одна из самых «тонких» настроек модельного комплекса. Используя известные формулировки $E - \varepsilon$ моделей параметризации турбулентного обмена, например из [8, 16], рассмотрим некоторые их изменения, приводящие, по нашему мнению, к более успешной реализации в рамках развиваемого нами вариационного подхода с применением концепции сопряженных интегрирующих множителей.

Запишем основные уравнения по вертикали. По аналогии со структурой уравнений основной модели (1)–(10) представим их в виде уравнений типа конвекции–диффузии–реакции:

$$\frac{\partial E}{\partial t} - C_1 \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial E}{\partial z} + C_6 \omega \frac{\partial E}{\partial z} + E q_E = K_m Q^+ + r_E; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - C_5 \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + C_7 \omega \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \varepsilon q_\varepsilon = C_2 C_3 E Q^+ + r_\varepsilon; \quad (14)$$

$$Q = \left\{ \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] - \beta \frac{g}{\theta_v} \left(\frac{\partial \theta_v}{\partial z} - C_8 \gamma_{cv} \right) \right\};$$

$$q_E = \left[C_2 E \left(\frac{1}{K_m} + \frac{Q^-}{\varepsilon} \right) \right] \geq 0; \quad q_\varepsilon = \frac{1}{E} (C_3 K_m Q^- + C_4 \varepsilon) \geq 0;$$

$$Q = Q^+ - Q^-; \quad Q^+ = (|Q| + Q) / 2 \geq 0; \quad Q^- = (|Q| - Q) / 2 \geq 0;$$

$$K_m = C_2 E^2 / \varepsilon; \quad K_h = \beta K_m, \quad \beta = \beta(\text{Ri}) \cong \text{Pr}^{-1};$$

$$\text{Ri} = \frac{g}{\theta_v} \frac{\partial \theta_v}{\partial z} / \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2;$$

$$\beta = \begin{cases} 1,318 \frac{0,2231 - \text{Ri}}{0,2341 - \text{Ri}}, & \text{Ri} < 0,16; \\ 1,2, & \text{Ri} \geq 0,16. \end{cases}$$

Здесь Ri — градиентное число Ричардсона; $C_i (i = \overline{1,8})$ — постоянные параметры модели, $\theta_v = T_v (1000/p)^{0,286}$ — виртуальная потенциальная температура; $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ — модуль горизонтальной скорости ветра; K_m и K_h — вертикальные коэффициенты для моментов количества движения и скалярных функций состояния (температуры, компонент влажности, газовых и аэрозольных составляющих). В уравнениях (2)–(10) эти коэффициенты, обозначенные в общем виде как μ_ϕ , входят в состав тензора турбулентности в определении операторов $M(\phi)$. Горизонтальные коэффициенты определяются по модели Смагоринского. Новые искомые функции неопределенностей r_E, r_ε вводятся в модели параметризации турбулентности (13), (14) с теми же целями, что и в (2)–(10). Параметр β характеризует эффективность вклада момента ко-

личества движения по сравнению с переносом тепла. Функция Q — основной источник генерации турбулентности. Для обеспечения монотонности и устойчивости численных схем мы представили систему уравнений (13), (14) так, чтобы было удобно работать с разномасштабными механизмами типа продукции и деструкции и исключить появление фиктивных осцилляций при различной стратификации воздушных масс.

Граничные условия для моделей (1)–(10) и (13), (14) мы формулируем согласованно. На верхней границе воздушных масс выбираем их так, чтобы они были «естественными» в вариационном смысле. Это могут быть условия второго и третьего рода для отыскания функций состояния в процессе решения задачи. В данном случае для (13), (14) мы выбираем их при $z = z_H$: $E'(z) = 0$; $\varepsilon'(z) = 0$, где штрих означает первую производную. В условиях на нижней границе, представляющей высоту приземного слоя $Z_{Sh}(x, y)$ над рельефом поверхности Земли $Z_S(x, y)$, значения функций E и ε рассчитываются с учетом гидротермодинамических характеристик приземной атмосферы [8, 16].

Уравнения (13), (14) — локально-одномерные по вертикали. Они решаются вместе с уравнениями (2)–(10) в каждой точке сеточной области по горизонтальным переменным; зависимость от горизонтальных координат параметрическая. В алгоритмах для их решения мы используем дискретно-аналитические аппроксимации [14, 15], в результате чего гарантированно получаем точные, устойчивые и монотонные решения. Здесь имеется в виду тот факт, что схемы для локально-одномерных операторов конвекции–диффузии в рамках всей системы (13), (14), участвующих в схемах расщепления, при кусочно-постоянных коэффициентах в пределах одного сеточного интервала области определения переменных являются точными решениями основных и сопряженных уравнений.

Сценарии для Новосибирской городской агломерации

Для исследования климато-экологических процессов в городских агломерациях мы используем сценарный подход: строим мезоклиматы, отвечающие типичным погодным условиям в суточном ходе, и на их фоне рассматриваем процессы распространения примесей. Основная цель — оценить их характерные пространственно-временные масштабы [4, 7].

Рассмотрим один из примеров моделирования мезоклимата и распространения пассивной примеси в Новосибирской городской агломерации. Ее основную часть составляют города Новосибирск, Бердск, Искитим, Обь и крупные научные центры — спутники Новосибирска: Кольцово и Краснообск. Новосибирский академгородок является одним из районов города Новосибирска. По сравнению с такими сибирскими агломерациями, как Красноярская, этот индустриальный регион характеризуется не столь высокими антропогенными нагрузками,

однако и здесь случаются ситуации их повышенного уровня. Основные климатические факторы мезорегионального масштаба формируются в результате гидротермодинамического и экологического (окружающей среды) взаимодействия объектов Новосибирской агломерации с водными объектами — рекой Обь и водохранилищем Новосибирской ГЭС. Эти факторы действуют постоянно в режиме суточного и сезонного хода на фоне глобальных процессов.

В качестве примера приведем результаты моделирования двух типичных сценариев формирования мезоклиматов в регионе под действием фоновых потоков, а также полей концентрации примесей, сформированных под влиянием этих мезоклиматов. Расчеты выполнены на основе комплекса математических моделей гидродинамики, переноса и трансформации примесей мезорегионального масштаба, адаптированного к условиям Новосибирской агломерации. В составе динамической модели (2)–(14) участвуют процессы гидрологического цикла, использована параметризация процессов в приземном слое атмосферы, учтены основные неоднородности нескольких типов подстилающей поверхности: город, река, водохранилище, леса и сельскохозяйственные угодья.

В этих двух сценариях циркуляция атмосферы формируется под действием противоположно направленных фоновых потоков со скоростью ветра около 8 м/с, заданных на высоте 3000 м над поверхностью Земли, с учетом суточного хода солнечной радиации для летнего сезона. Городская агломерация рассматривается как совокупность распределенных источников техногенного загрязнения и как генератор «островов тепла» в атмосфере в режиме их взаимодействия с водными объектами. Источники примесей и искусственных потоков тепла задаются в параметризованном виде с учетом интенсивности антропогенных нагрузок и транспортных потоков на городских участках территории агломерации.

Результаты сценарных расчетов по формированию мезоклиматов и качества атмосферы для Новосибирской агломерации для двух сценариев моделирования показаны на рис. 1, 2. На рис. 1 дано двумерное сечение трехмерных полей горизонтальных скоростей ветра и концентраций примесей на уровне приземного слоя в 07:00 местного времени. Этот сценарий выполнен для северо-восточного фонового потока, заданного на высоте 3 км. Аналогичная ситуация, только для юго-западного фонового потока, показана на рис. 2. Концентрации пассивных примесей даны в условных относительных единицах, соответствующих распределенным источникам загрязнения, заданным с учетом категорий землепользования в агломерации.

Из анализа результатов серий сценарных расчетов для различных сочетаний входных параметров следует, что под влиянием островов тепла и холода в агломерации формируются локальные циркуляционные системы. Характерные масштабы областей влияния городских островов тепла составляют по горизонтали около 20 км и по вертикали от

500 м до 2 км. Холодная река разделяет самый большой остров тепла на две части. В режиме суточного и сезонного хода над городскими районами возникают области с повышенными уровнями концентраций загрязняющих примесей. На границах город–окрестности в структуре полей функций состояния заметны эффекты типа внутренних пограничных слоев. В пространственно-временной динамике полей ветра, температуры и концентраций примесей в вертикальной структуре течений проявляются волнообразные движения [17].

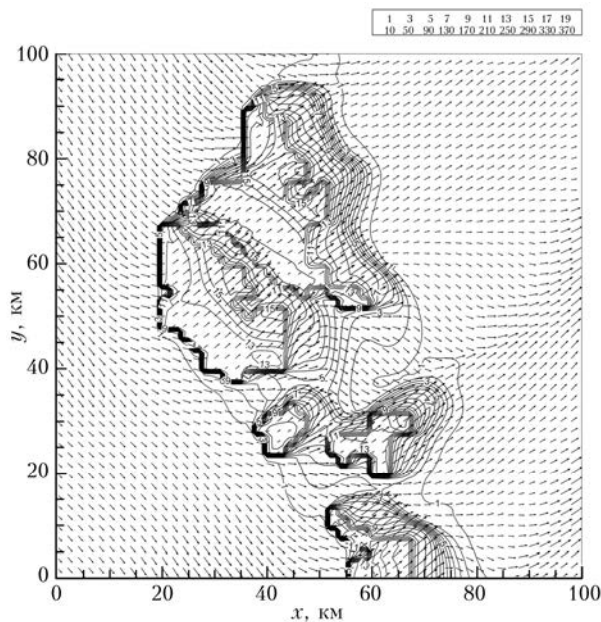


Рис. 1. Новосибирская агломерация. Двумерные разрезы полей ветра и концентрации примесей в 07:00 местного времени: горизонтальное сечение на верхней границе приземного слоя. NE-фоновый поток задан на высоте 3 км

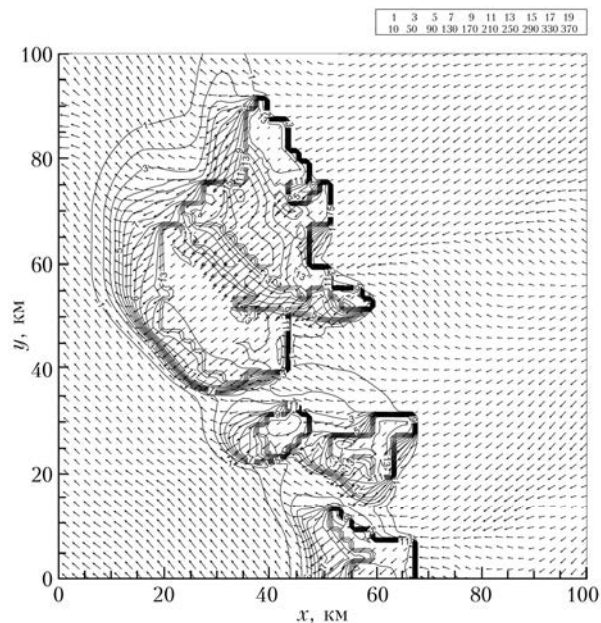


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, только SW-фоновый поток задан на высоте 3 км

Заключение

Представленная здесь система моделирования на основе совместного использования математических моделей динамики и химии атмосферы ориентирована на решение задач охраны окружающей среды: оценки фактического состояния и возможностей управления качеством атмосферы индустриально нагруженных городских агломераций в нормальных и экстремальных ситуациях. Сформулирован вариационный подход с применением сопряженных интегрирующих множителей для построения системы моделирования сложных разномасштабных процессов типа конвекции–диффузии–реакции и усвоения доступных данных наблюдений. Предложен новый способ реализации модели параметризации процессов вертикального турбулентного обмена при произвольной стратификации атмосферы. Приведены результаты сценариев моделирования по формированию типичных мезоклиматов и процессов переноса примесей в структуре Новосибирской городской агломерации.

Благодарим рецензентов за тщательный анализ рукописи.

Работа выполняется при поддержке программ фундаментальных исследований Президиума РАН I.33П и II.2П, а также РФФИ (грант № 17-01-00137-а).

1. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 319 с.
2. Марчук Г.И., Пененко В.В., Алоян А.Е., Лазриев Г. Численное моделирование микроклимата города // Метеорол. и гидрол. 1979. № 8. С. 5–15.
3. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометиздат, 1981. 352 с.
4. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
5. *Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models* / Eds. A. Baklanov, A. Machura, R. Sokhi. Heidelberg; Dordrecht: Springer, 2011. 242 p.
6. *Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months*. Geneva: WMO, 2015. 471 p.

V.V. Penenko, E.A. Tsvetova. **Mathematical modeling of climate and ecological processes in urban areas.**

We discuss the development of a modeling system for the study of climatic and environmental problems in urban areas exposed to natural and anthropogenic impacts. Some typical tasks are considered: formation of mesoclimates and air quality of urban agglomerations against the background of global processes in specific regions. The models of hydrodynamics, transport, and transformation of various substances in the gas and aerosol states are used for solving direct and inverse problems of this class. The modeling technology is based on variational principles and the concept of adjoint integrating factors. This provides a consistent unification of all the models, the construction of numerical schemes, and assimilation of operational data from various monitoring tools. We propose a new algorithm for the implementation of the model for parameterization of the vertical turbulent exchange in the arbitrary stratified atmosphere. The results of the scenarios of the formation of the typical mesoclimates and distribution of impurities in the atmosphere of Novosibirsk agglomeration are presented.

7. Oke T. Boundary layer climates. Routledge, 2002. 464 p.
8. *Atmospheric Boundary layers. Nature, theory, and application to environmental modeling and security* / Eds. A. Baklanov, B. Grisogono. Springer Science + Business Media, 2007. 241 p.
9. Bocquet M., Elbern H., Eskes H., Hirtl M., Žabkar R., Carmichael G.R., Flemming J., Inness A., Pagowski M., Pérez Camacho J.L., Saide P.E., San Jose R., Sofiev M., Vira J., Baklanov A., Carnevale C., Grell G., Seigneur C. Data assimilation in atmospheric chemistry models: current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 5325–5358. DOI: 10.5194/acp-15-5325-2015.
10. Пененко В.В. О концепции природоохранного прогнозирования // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 432–438.
11. Penenko V., Baklanov A., Tsvetova E., Mahura A. Direct and Inverse Problems in a Variational Concept of Environmental Modeling // Pure Appl. Geophys. 2012. V. 169. P. 447–465. DOI: 10.1007/s00024-011-0380-5.
12. Пененко В.В., Цветова Е.А., Пененко А. В. Развитие вариационного подхода для прямых и обратных задач гидротермодинамики и химии атмосферы // Изв. АН. Физ. атмосф. и океана. 2015. Т. 51, № 3. С. 358–367.
13. Пененко В.В., Цветова Е.А., Пененко А.В. Методы совместного использования моделей и данных наблюдений в рамках вариационного подхода для прогнозирования погоды и качества состава атмосферы // Метеорол. и гидрол. 2015. № 6. С. 13–24.
14. Пененко В.В., Цветова Е.А. Вариационные методы построения монотонных аппроксимаций для моделей химии атмосферы // Сиб. ж. вычисл. матем. 2013. Т. 16, № 3. С. 239–252.
15. Penenko V.V., Tsvetova E.A., Penenko A.V. Variational approach and Euler's integrating factors for environmental studies // Comput. Math. Appl. 2014. V. 67, N 12. P. 2240–2256. DOI: 10.1016/j.camwa.2014.04.004.
16. Langland R.H., Chi-Sann Liou. Implementation of an $E - \epsilon$ parametrization of vertical subgrid-scale mixing in a regional model // Month. Weather Review. 1996. V. 124, N 5. P. 905–918.
17. Penenko V.V., Tsvetova E.A. A variational approach to environmental and climatic problems of urban agglomeration // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. V. 48, UNSP 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012020.