

О концепции природоохранного прогнозирования

В.В. Пененко*

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

Поступила в редакцию 29.01.2010 г.

Излагается концепция природоохранного прогнозирования, базирующаяся на вариационных принципах. В отличие от других подходов она основана на оценке риска и уязвимости территорий по отношению к антропогенным воздействиям и позволяет оценить влияние неопределенностей на качество прогноза. Реализация концепции связана с решениями прямых, сопряженных и обратных задач для математических моделей гидродинамики, переноса и трансформации примесей и расчета соотношений чувствительности функционалов качества атмосферы. Обсуждаются преимущества предлагаемого подхода по сравнению с традиционной технологией прогнозирования.

Ключевые слова: природоохранное прогнозирование, качество атмосферы, вариационные принципы, риск, уязвимость, обратные задачи; environmental forecasting, atmospheric quality, variational principles, risk, vulnerability, inverse problems.

Введение

Проблемы прогнозирования изменений качества природной среды под воздействием естественных и антропогенных факторов относятся к новому классу взаимосвязанных задач экологии и климата. Для этого класса задач понятия рисков и уязвимости территорий, обусловленных интенсивными выбросами загрязняющих примесей, тепла и влаги, а также изменениями характеристик поверхности Земли, имеют фундаментальное значение. Для решения этих задач и доведения получаемых результатов до восприятия их обществом требуются новые эффективные методы исследования и технологии математического моделирования, основанные на совместном использовании моделей и фактических данных о процессах в природной среде. Обзор современных подходов к созданию таких технологий и библиографию по этим вопросам можно найти, например, в работах [12, 18].

Цель настоящей статьи состоит в изложении основных положений нашей концепции природоохранного прогнозирования на базе вариационных принципов, которая сформировалась к настоящему времени в ИВМиМГ СО РАН.

Характеристика методов прогнозирования

Модели качества атмосферы представляют собой многофункциональные комплексы. В зависимости от целей исследования они включают:

– модели динамики атмосферы, переноса и трансформации примесей в газовом и аэрозольном состояниях;

– способы задания и оценок эмиссионных факторов действующих и потенциально возможных источников;

– количественные описания неблагоприятных воздействий на здоровье населения и экосистемы;

– методологию социальных и экономических оценок антропогенных воздействий и т.д.

Основной количественной характеристикой воздействий на окружающую среду являются функции, описывающие концентрации многокомпонентных газоаэрозольных субстанций, распределенные в четырехмерной пространственно-временной области, для расчета которых создаются информационно-прогностические системы. Традиционный подход к решению таких задач обычно базируется на методах прямого моделирования. Суть их состоит в проведении сценарных расчетов при различных способах задания входных данных и внешних воздействий.

Для получения приемлемых результатов нужно знать всю информацию об источниках воздействий и начальных полях функций состояния, что практически невозможно. В задачах прогноза погоды практикуется расчет сценарных ансамблей, которые, до некоторой степени, позволяют бороться с неопределенностями различного характера [13, 17]. Однако, несмотря на распространение этого подхода, он не может решить всего комплекса вопросов на современном уровне.

Методы прямого моделирования целесообразно использовать для краткосрочного прогнозирования элементов химической и аэрозольной погоды в реальном времени. Для оценок долгосрочных экологических перспектив и природоохранного проектирования

* Владимир Викторович Пененко (Penenko@sscc.ru).

в условиях изменяющегося климата требуются новые подходы.

Предлагаемая нами концепция прогнозирования базируется на вариационных принципах и реализуется комбинированными методами прямого и обратного моделирования. Это дает новые постановки задач прогнозирования и проектирования и расширяет области их применения.

Одна из основных идей состоит в том, чтобы, кроме прогнозирования методами прямого моделирования, оценивать, используя вариационные принципы, обобщенные характеристики развития ситуаций и по ним рассчитывать относительную долю вклада всех действующих и потенциально возможных источников в загрязнение выделенных территорий-рецепторов. При этом математические модели процессов, оценки эмиссионных факторов, экспозиционных воздействий и социально-экономических последствий выступают в роли ограничений на класс функций для оценок целевых функционалов обобщенных характеристик. Все обобщенные характеристики определяются в виде функционалов на пространствах функций состояния и параметров моделей. Они выражаются интегралами с соответствующими весовыми функциями.

При таком подходе прогностическая технология обратного моделирования реализуется в два этапа.

На *первом этапе* не требуется информации об источниках примесей, а расчеты осуществляются методами обратного моделирования и методами теории чувствительности целевых функционалов. Этим мы освобождаемся от трудноразрешимых проблем с инициализацией моделей переноса газовых и аэрозольных субстанций, от задания параметров эмиссии в регионе и от задания информации в граничных условиях для учета трансграничных переносов. Основным элементом прогнозирования является совокупность решений сопряженных задач для целевых функционалов и функций чувствительности, по которым оцениваются функции риска и уязвимости и рассчитываются функции влияния неопределенностей моделей и входных данных.

На *втором этапе* по функциям чувствительности осуществляется районирование территорий по степени риска и уязвимости и рассматривается относительный вклад каждого источника, попадающего в области чувствительности, в суммарный функционал качества. Таким образом, результатом прогноза будут не концентрации примесей, а области риска получения загрязнений заданного уровня. Если имеются данные об источниках, то, при необходимости, рассчитываются поля концентраций примесями прямыми методами.

Формирование гидродинамического фона для расчета прогностических сценариев осуществляется с помощью математических моделей циркуляции атмосферы с использованием всей доступной фактической информации. В модели включается направляющее фазовое пространство, рассчитываемое с помощью реконструкции полей по информативным базисам [8, 15]. Сами базисы рассчитываются методами ортогональной декомпозиции баз данных кли-

матической информации по заданным критериям информативности. При разработке методов реализации концепции для этих целей использовалась база данных реанализа за 1950–2007 гг. [14]. Методы декомпозиции являются эффективным инструментом для общего анализа ситуаций и выявления областей климатически обусловленных рисков [15].

Реализация концепции прогнозирования

Постановка задачи

В комплекс математических моделей входят модели динамики атмосферы, предназначенные для формирования гидродинамики несущей среды, а также модели, описывающие процессы переноса и трансформации различных субстанций, предназначенные для воспроизведения и прогнозирования качества атмосферы.

Структуру этих моделей можно представить в операторном виде

$$L(\varphi, \mathbf{Y}) \equiv \mathbf{B} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + G(\varphi, \mathbf{Y}) - \mathbf{f} - \mathbf{r} = 0; \quad \varphi(\mathbf{x}, t) \in Q(D_t), \quad (1)$$

$$\varphi^0 = \varphi_a^0 + \xi; \quad \mathbf{Y} = \mathbf{Y}_a + \zeta, \quad (2)$$

где $Q(D_t)$ – вещественное пространство вектор-функций состояния; \mathbf{B} – блочная диагональная матрица; $G(\varphi, \mathbf{Y})$ – нелинейный матричный дифференциальный оператор; \mathbf{f} – функции источников; \mathbf{Y} – вектор параметров модели, принадлежащий области допустимых значений $R(D_t)$; φ^0 – начальное состояние; $\varphi_a^0, \mathbf{Y}_a$ – их априорные оценки; $D_t = D \times [0, \bar{t}]$, D – область изменения пространственных координат; $t \in [0, \bar{t}]$ – интервал изменения времени. Область D может быть глобальной на сферической Земле либо ограниченной частью глобальной системы.

Опуская представление гидродинамической части комплекса, приведем только формулировку моделей из (1), (2), описывающих процессы конвекции, диффузии, реакций. Они являются ключевыми элементами в постановках природоохранных задач:

$$\frac{\partial \pi \varphi_i}{\partial t} + \operatorname{div} \pi (\varphi_i \mathbf{u} - \mu_i \operatorname{grad} \varphi_i) + \pi (S \varphi)_i - \pi [f_i(\mathbf{x}, t) + r_i] = 0, \quad (3)$$

$$i = \overline{1, n_s}.$$

Здесь $\varphi = \{\varphi_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n_s}\} \in Q(D_t)$ – часть вектор-функций состояния всего комплекса моделей (1), описывающих поведение различных субстанций в четырехмерной области D_t ; $n_s \geq 1$ – число компонент; функции φ_i описывают температуру, компоненты гидрологического цикла в атмосфере (водяной пар, облачная вода, дождевая вода, снег и ледовые кристаллы), концентрации загрязняющих примесей в газовом и аэрозольном состояниях; $\mathbf{f} = \{f_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n_s}\}$ – функции источников тепла, влаги и примесей; $\mathbf{r} = \{r_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n_s}\}$ – функции

неопределенности; $(S\varphi)_i$ – нелинейные матричные операторы, которые описывают локальные процессы трансформации соответствующих субстанций и не содержат производных от функций состояния по \mathbf{x} и t . В уравнения (3) явно входят следующие характеристики гидродинамического фона: $\{\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3), \mu_i = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)_i\}$, представляющие вектор скорости и диагональный тензор коэффициентов турбулентного обмена для субстанции φ_i в направлении пространственных координат $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, x_3\}$; π – функция, определяемая через метеоэлементы в соответствии со структурой вертикальной координаты в области D_t . Заметим, что функция π и вектор скорости удовлетворяют уравнению неразрывности несущей среды. Краевые условия для замыкания моделей следуют из физического содержания изучаемой задачи и включаются в определение класса функций $Q(D_t)$. Они могут представлять собой условия Дирихле, Неймана и условия третьего рода на различных участках границы области D_t . Модели процессов, структура областей и системы координат, используемые в настоящей статье, подробно описаны в [3–6].

Данные и модели наблюдений

Обозначим через Ψ_m набор данных измерений на множестве $D_t^m \subset D_t$ и определим совокупность моделей наблюдений $H(\varphi)$ для формирования образов измеряемых величин в терминах функций состояния моделей процессов (1)–(3):

$$\Psi_m = [H(\varphi)]_m + \eta. \quad (4)$$

Здесь $[\bullet]_m$ – оператор переноса информации, определенной в области D_t , на множество D_t^m .

Функции $\mathbf{r}, \xi, \zeta, \eta$ в (1)–(4) описывают неопределенности и ошибки соответствующих объектов. При построении алгоритмов в число компонент вектора параметров удобно включать не только внутренние характеристики моделей, но и функции, описывающие источники, начальные условия и неоднородности краевых условий.

Функционалы обобщенных оценок

Задачи оценки состояния окружающей среды и природоохранного прогнозирования имеют многоцелевой характер. Поэтому для их решения требуется технология моделирования, адаптируемая к различным постановкам и критериям. Чтобы это обеспечить, в систему, кроме математических моделей, вводится набор обобщенных характеристик. Такие характеристики для количественных оценок будем задавать в виде функционалов, определенных на множестве переменных состояния и параметров:

$$\begin{aligned} \Phi_k(\varphi) &= \int_{D_t} F_k(\varphi) \chi_k(\mathbf{x}, t) dDdt \equiv (F_k, \chi_k), \\ \chi_k &\in Q^*(D_t), \quad k = \overline{1, K}, \quad K \geq 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $F_k(\varphi) \in Q(D_t)$ – оцениваемые функции заданного вида, ограниченные и дифференцируемые относительно φ ; $\chi_k(\mathbf{x}, t) \geq 0$; $\chi_k(\mathbf{x}, t) dDdt$ – неотрицательные весовые функции и соответствующие им меры Радона или Дирака [11]; $Q^*(D_t)$ – пространство функций, сопряженных по отношению к $Q(D_t)$. Символом (F_k, χ_k) обозначается скалярное произведение. Носители ненулевых значений весовых функций будем интерпретировать как области-рецепторы в D_t , конфигурации которых задаются как входные параметры в конструкциях (5). Если требуется учитывать распределенные характеристики состояния исследуемых процессов типа равенств и неравенств, то они представляются в эквивалентной интегральной форме типа (5).

Вариационные принципы для организации технологии прогнозирования

Для решения задач используем вариационный принцип [4]. Определим расширенный функционал, объединяющий все элементы системы моделирования (1)–(5):

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_k^h(\varphi, \mathbf{Y}, \varphi_k^*, \mathbf{r}, \xi, \zeta) &= [I^h(\varphi, \mathbf{Y}, \varphi_k^*)]_{D_t^h} + \\ &+ \left[\alpha_0 \Phi_k(\varphi) + 0,5 \alpha_1 (\eta^T W_1 \eta)_{D_t^m} \right]^h + \\ &+ 0,5 \left[\alpha_2 (\mathbf{r}^T W_2 \mathbf{r})_{D_t^h} + \alpha_3 (\xi^T W_3 \xi)_{D_t^h} + \alpha_4 (\zeta^T W_4 \zeta)_{R^h(D_t^h)} \right]^h, \\ k &= \overline{1, K}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I(\varphi, \mathbf{Y}, \varphi^*) &\equiv [L(\varphi, \mathbf{Y}, \varphi^*)] = \\ &= \int_{D_t} \left[B \frac{\partial \varphi}{\partial t} + G(\varphi, \mathbf{Y}) - \mathbf{f} - \mathbf{r}, \varphi^* \right] dDdt = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $\varphi^* \in Q^*(D_t)$ – вспомогательные функции, определяемые спецификой вариационного принципа и принадлежащие пространству, сопряженному по отношению к пространству функций состояния; функционал $I(\varphi, \mathbf{Y}, \varphi^*) = 0$ представляет собой интегральное тождество для описания моделей (1)–(3) в вариационной формулировке; $\Phi_k(\varphi)$ – целевой функционал вида (5); индексом h отмечены дискретные аналоги соответствующих объектов; $\alpha_i \geq 0, i = \overline{0, 4}$, – весовые коэффициенты; индекс T обозначает операцию транспонирования. Последние четыре функционала в (6) выражают суммарную меру неопределенностей в моделях и данных. Они получены с помощью скалярных произведений энергетического типа. В третьем слагаемом выражения (6), содержащем функцию η из (4), учитываются все доступные данные наблюдений Ψ_m . Функционал в (7) выбирается так, чтобы при $\varphi^* = \varphi$ это соотношение превращалось в уравнение баланса полной энергии системы. Весовые матрицы $W_i (i = \overline{1, 4})$ в (6) определим таким образом, чтобы функционалы выражали энергетическую норму, учитывающую различия в физических

размерностях соответствующих многокомпонентных функций. Общая структура этих функционалов описывается формулами вида (5) с соответствующим заданием оцениваемых и весовых функций. При таком способе задания весовых функций и мер все функционалы для дискретных и распределенных характеристик получаются по единому правилу, что является существенным при построении и реализации адаптивных алгоритмов, которые должны работать в режиме слежения за пространственно-временной динамикой носителей различных информационных полей.

Построение дискретных аппроксимаций

Для этих целей вводится сеточная область $D_t^h \in D_t$, и для дискретизации операторов и функционалов используются методы расщепления и декомпозиции. Численные схемы для операторов конвекции – диффузии – реакции строятся с помощью конструктивного аппарата локально-сопряженных задач, обеспечивающего свойства монотонности, устойчивости при высокой точности аппроксимаций [16].

Не описывая подробно вычислительную технологию, представим ее основные элементы, реализующие условия стационарности расширенного функционала (6) по отношению к вариациям его функциональных аргументов:

$$\partial \tilde{\Phi}_k^h / \partial \mathbf{s} = 0 \quad (\mathbf{s} = \boldsymbol{\varphi}^*, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\zeta})^h. \quad (8)$$

В результате преобразований по алгоритму (8) получается комплекс дискретно-аналитических аналогов базовых элементов технологии прогнозирования: одна система уравнений для основной прямой задачи (1)–(3), K систем для сопряженных задач и по K систем для расчета каждой из функций неопределенностей. Здесь K – число функционалов качества. Всего получается пять типов задач по числу функциональных аргументов в (8). Все они порождаются вариационным принципом по одному и тому же правилу. Это и обеспечивает их взаимную согласованность. В силу условий (8) численные схемы являются оптимальными с позиций оценивания вариаций функционалов (6), (7). Оптимальность состоит в том, что оценки прогностических функционалов не зависят от ошибок прогнозируемых функций состояния, обусловленных совокупностью ошибок входных данных и параметров моделей.

Системы (8), при использовании метода расщепления и декомпозиции, представляют собой совокупности схем расщепления. Здесь удобны аддитивно-усредненные схемы покомпонентного расщепления, свойства которых детально описаны в [9]. Эти схемы позволяют на каждом интервале времени независимо реализовать все этапы расщепления и обеспечить параллельную структуру вычислений в целом.

Первая схема в (8) представляет собой набор численных схем и алгоритмов реализации основных задач (1)–(3) методами прямого моделирования. Функции источников для сопряженных задач рассчитываются по формулам дифференцирования (8) второго слагаемого в (6) по $\boldsymbol{\varphi}$, т.е.

$$\frac{\partial \left\{ \alpha_0 \Phi_k(\boldsymbol{\varphi}) + 0,5 \alpha_1 (\boldsymbol{\eta}^T W_1 \boldsymbol{\eta})_{D_t^m} \right\}^h}{\partial \boldsymbol{\varphi}}, \quad \forall \boldsymbol{\varphi} \in Q^h(D_t^h)$$

с предварительной заменой $\boldsymbol{\eta}$ с помощью (4).

Алгоритмы теории чувствительности

После решения перечисленных задач рассчитываются соотношения чувствительности для оценок вариаций целевых функционалов и формирования обратных связей с помощью алгоритма

$$\begin{aligned} \delta \Phi_k^h(\boldsymbol{\varphi}) &\equiv \left(\text{grad}_{\mathbf{Y}} \Phi_k^h(\boldsymbol{\varphi}), \delta \mathbf{Y} \right) \equiv \\ &\equiv \frac{\partial}{\partial \alpha} I^h(\boldsymbol{\varphi}, \mathbf{Y} + \alpha \delta \mathbf{Y}, \boldsymbol{\varphi}_k^*) \Big|_{\alpha=0} \equiv (\Gamma_k, \delta \mathbf{Y}); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Gamma_k \equiv \text{grad}_{\mathbf{Y}} \Phi_k^h(\boldsymbol{\varphi}) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \alpha} I^h(\boldsymbol{\varphi}, \mathbf{Y} + \alpha \delta \mathbf{Y}, \boldsymbol{\varphi}_k^*) \Big|_{\alpha=0} \right\}, \quad (10)$$

$$\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = -\kappa \text{grad}_{\mathbf{Y}} \Phi_k^h(\boldsymbol{\varphi}), \quad k = \overline{1, K}, \quad (11)$$

где $\delta \mathbf{Y}$ – вариации параметров; α, κ – вещественные параметры; $\boldsymbol{\varphi}$ – решение основной задачи; $\boldsymbol{\varphi}_k^*$ – решения сопряженных задач, порожденных функционалом $\tilde{\Phi}_k$ ($k = \overline{1, K}$) при заданных значениях набора параметров \mathbf{Y} ; Γ_k – вектор, компоненты которого представляют собой функции чувствительности (ФЧ) функционала $\Phi_k^h(\boldsymbol{\varphi})$ к вариациям компонент вектора \mathbf{Y} . Как уже отмечалось выше, для удобства построения алгоритмических конструкций функции источников, начальных данных моделей включены в число компонент вектора параметров $\mathbf{Y} = \{Y_i, i = \overline{1, N}\}$.

Соотношения (9) определяют скалярное произведение для исследования фазового пространства ФЧ, определенных в D_t^h и $R(D_t^h)$, согласованное с (5)–(8). Структура этого пространства определяется структурой и размерностями компонент вектора параметров и видом функционала интегрального тождества и его дискретных аналогов.

Алгоритм (9), (10) определяет совокупность всех ФЧ каждого из функционалов $\Phi_k^h(\boldsymbol{\varphi})$ к вариациям параметров моделей, а алгоритм (11) – систему уравнений обратных связей от функционалов к параметрам, которые, в частности, используются для решения обратных задач и усвоения данных.

Таким образом, в рамках вариационного принципа участвуют функционалы трех основных типов: (5), (7), (9), которые определяются как скалярные произведения. Из них (5) и (7) определяют метрику и норму в пространствах переменных состояния и параметров, а (9) – метрику и нормы в фазовых пространствах ФЧ.

Об оценках экологических рисков

Методы теории чувствительности удобно непосредственно использовать для оценок и прогнозирования экологических рисков и уязвимости территорий

по отношению к воздействиям антропогенных факторов, учитываемых в моделях процессов. Прокомментируем с этих позиций смысл соотношения чувствительности (9). Самое главное — оно показывает, что все элементы моделей взаимосвязаны и для оценок функционалов необходимо учитывать возможные возмущения всех входных параметров и внешних источников.

Особо следует отметить выражения, содержащие источники тепла, влаги и примесей. Множители, стоящие при вариациях источников, есть соответствующие ФЧ. Они являются мерой непосредственного влияния вариаций источников на значение вариаций функционала (в линейных задачах — влияния самих источников на значение функционала). Но эти слагаемые не полностью описывают влияние источников на функционал. Имеется еще косвенный вклад, который вносится совокупным действием других слагаемых с ФЧ. Например, это слагаемые, содержащие вариации коэффициентов турбулентности, функции приземного давления, геопотенциала, параметров оператора трансформации примесей и др.

С позиций экологии действие каждого источника, даже в так называемых нормальных режимах, представляет определенную опасность для окружающей среды. Сам факт, что источники находятся в области чувствительности функционалов, уже говорит о наличии риска поступления загрязнений от них в область рецептора. ФЧ функционалов (5) к вариациям источников определяются в области D_t . В зависимости от целей исследования и для удобства интерпретации их можно называть функциями влияния или опасности источников, ценности информации, информативности системы мониторинга и т.д. Носители этих функций можно также интерпретировать как области наблюдаемости территории с помощью системы мониторинга, расположенной в области-рецепторе для оценок функционалов $\Phi_k^h(\varphi)$. Некоторые способы оценок такого рода на базе соотношений чувствительности при случайных и детерминированных возмущениях параметров в моделях динамики атмосферы рассмотрены в монографии [4].

В задачах экологического проектирования, в дополнение к оценкам ситуации в целом, необходимо рассмотреть и возможные наихудшие случаи для качества атмосферы в зоне-рецепторе. С этой целью производится выявление областей локальных максимумов ФЧ и областей расположения источников большой потенциальной мощности (в отношении эмиссии загрязняющих примесей). При совпадении этих областей возможно возникновение ситуаций высокого экологического риска (уязвимости). Знание подобной информации необходимо для принятия решений по управлению рисками на этапе проектирования.

Находясь в рамках вариационного подхода и выполняя операции, предусмотренные алгоритмами (8)–(11), исследователь рассматривает всю климатическую систему, определенную моделями в D_t и содержащую различные источники естественных и антропогенных воздействий, с точки зрения зоны-рецептора. Это значит, что категории опасно-

сти, риска, уязвимости можно дополнить понятием информативности системы мониторинга, расположенной на территории рецептора, и связать эти категории с понятием наблюдаемости систем. Общее условие наблюдаемости для моделей рассматриваемого класса заключается в том, чтобы носители ФЧ, рассчитываемых для выбранного функционала измерений, накрывали области действия оцениваемых параметров или источников. Эти свойства функций наблюдаемости для распределенной системы мониторинга используются для обнаружения местоположения и времени действия источников, попадающих в области риска-наблюдаемости, но недоступных непосредственным измерениям [7].

Роль сопряженных задач и функций неопределенностей

Фундаментальная роль сопряженных задач в вариационной технологии моделирования сложных систем состоит в том, что они являются инструментом для формирования связей между возмущениями объектов в пространстве функций состояния $Q(D_t)$ с возмущениями объектов в пространстве параметров. Они замыкают на себя все внутренние степени свободы численной модели, и организация прогнозирования осуществляется на основе соотношений чувствительности. В этом и содержится основная идея концепции: перейти из пространства функций состояния в пространство параметров и источников, чтобы работать методами теории чувствительности и обратных задач на уровне целевых функционалов только с внешними степенями свободы.

Принципиальным элементом предлагаемой концепции является также способ оценок функций неопределенностей. Эти функции, по существу, содержат количественную информацию о степени адекватности технологии прогнозирования при выбранной структуре моделей процессов и точности входных данных. Функции неопределенности дают дополнительный выигрыш с вычислительной точки зрения. Их учет в моделях (1)–(3) и функционалах (8) вносит эффекты естественной регуляризации в алгоритмы решения обратных задач и усвоения данных [8] и повышает степень их обусловленности.

Вариационные формулировки системы прогнозирования с оценкой неопределенностей позволяют построить высокоэффективные алгоритмы последовательного усвоения данных в реальном времени. Действительно, функции неопределенностей r и ξ выражаются через решения сопряженных задач с выписанными выше функциями источников, содержащих невязки между данными измерений и их образами, рассчитанными по моделям наблюдений в (4). Поэтому, если функции r и ξ рассчитаны и учтены в системах уравнений (1)–(3), при таком подходе имеется существенный выигрыш в реализации по сравнению с методами усвоения типа фильтрации Калмана, где требуется находить ковариационные матрицы для включения данных наблюдений. Более того, алгоритмы усвоения данных реализуются прямыми методами в темпе решения задач прогноза

и поступления новых данных наблюдений [8], если использовать методы декомпозиции и расщепления с локально-сопряженными задачами в пределах «окна» усвоения.

Совместный анализ функций чувствительности, наблюдаемости и неопределенности вносит также новое качество в организацию адаптивных стратегий мониторинга, когда кроме фиксированной системы наблюдений требуется спланировать наблюдательные эксперименты на базе подвижных средств измерений. Для размещения таких наблюдений в первую очередь целесообразно рассматривать области с повышенными уровнями неопределенностей и чувствительности и с пониженными уровнями значений наблюдаемости на базе фиксированной системы мониторинга. Это направление имеет перспективу практического использования при формировании наблюдательных программ, сочетающих стационарные и мобильные средства мониторинга с интерактивными методами усвоения данных [1, 2, 10].

Заключение

В заключение сформулируем преимущества предлагаемой концепции по сравнению с традиционными подходами прямого моделирования.

Вариационные формулировки задач, используемые в информационно-моделирующей технологии, обеспечивают высокую степень согласованности моделей различных пространственно-временных масштабов, численных схем и алгоритмов их реализации. Это позволяет уменьшить степень неопределенности всех компонентов системы моделирования. Применение алгоритмического аппарата теории чувствительности позволяет прогнозировать степень риска и уязвимости без детального знания источников возмущений и начальных полей функций состояния. Получаемые количественные оценки неопределенностей повышают степень адекватности прогнозов без привлечения дорогостоящих сценарных ансамблей.

Совместное использование аппарата теории чувствительности, оценок неопределенностей и локальных сопряженных задач дает новые эффективные методы последовательного усвоения данных. При этом функции неопределенности исключают потребность в расчете ковариационных матриц. Организация сценариев долгосрочного прогнозирования с использованием информативных базисов для малопараметрической реконструкции многомерных фазовых пространств создает предпосылки для повышения степени достоверности прогнозов. Численные методы, построенные на вариационных принципах, отвечают потребностям современных вычислительных технологий по качеству и эффективности реализации.

Такой подход в природоохранном прогнозировании удобен при проектировании новых объектов и организации природоохранных мероприятий с позиций минимизации рисков для населения и адаптации его к изменяющимся условиям. Действительно, количественные оценки вкладов каждого источника делают «прозрачными» отношения между объектами-

источниками примесей и объектами-получателями загрязнений. Это удобно для принятия управленческих решений по обеспечению стандартов качества в упреждающем режиме и выявлению источников-нарушителей требований стандартов. Анализируя функции риска, можно разделить степень опасности от источников, которые расположены в регионе и за его пределами.

Работа выполнена при поддержке Программ 16 Президиума РАН и 1.3 ОМН РАН, а также проекта РФФИ № 07-05-00673.

1. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Излев Г.А., Козлов А.С., Козлов В.С., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сафатов А.С., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э»: 20 лет исследований окружающей среды // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 10. С. 950–957.
2. Белан Б.Д., Излев Г.А., Козлов А.С., Маринайте И.И., Пененко В.В., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Фофанов А.В., Ходжер Т.В. Сравнительная оценка состава воздуха промышленных городов Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 5. С. 428–437.
3. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 319 с.
4. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 352 с.
5. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
6. Пененко В.В., Цветова Е.А. Структура комплекса моделей для исследования взаимодействий в системе «озеро Байкал – атмосфера региона» // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 586–593.
7. Пененко В.В., Цветова Е.А. Оптимальное прогнозирование природных процессов с оценкой неопределенности // Прикл. мех. и техн. физ. 2009. № 2. С. 156–166.
8. Пененко В.В. Вариационные методы усвоения данных и обратные задачи для изучения атмосферы, океана и окружающей среды // Сиб. ж. вычисл. мат. 2009. Т. 12. № 4. С. 421–434.
9. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Аддитивные схемы для задач математической физики. М.: Наука, 2001. 319 с.
10. Тарасова О.А., Бреннинкмайер К.А.М., Еланский Н.Ф., Кузнецов Г.И., Асонов С.С. Исследование изменчивости монооксида углерода над Россией по данным экспедиции TROICA // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 511–516.
11. Шварц Л. Анализ. Т. 1. М.: Мир, 1972. 824 с.
12. Baklanov A., Hänninen O., Slordal L.H., Kukkonen J., Bjergene N., Fay B., Finardi S., Hoe S.C., Jantunen M., Karppinen A., Rasmussen A., Skouloudis A., Sokhi R.S., Sorensen J.H., Odegaard V. Integrated systems for forecasting urban meteorology, air pollution and population exposure // Atmos. Chem. and Phys. 2007. V. 7. N 3. P. 855–874.
13. Ehrendorfer M., Tribbia J.J. Optimal prediction of forecast error covariances through singular vectors // J. Atmos. Sci. 1997. V. 54. N 2. P. 286–313.
14. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Cheliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Jonowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/

- NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. N 3. P. 437–471.
15. *Penenko V., Tsvetova E.* Orthogonal decomposition methods for inclusion of climatic data into environmental studies // Ecol. Model. 2008. V. 217. N 12. P. 279–291.
16. *Penenko V., Tsvetova E.* Discrete-analytical methods for the implementation of variational principles in environmental applications // J. Comput. and Appl. Math. 2009. V. 226. N 2. P. 319–330.
17. *Toth Z., Kalnay E.* Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1993. V. 74. N 12. P. 2317–2330.
18. *Zhang Y.* Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status, and outlook // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8. N 11. P. 2895–2932.

V.V. Penenko. On a concept of environmental forecasting.

A concept of environmental forecasting is presented. It is based on variational principles. This concept, unlike others, is built on risk and vulnerability assessment with respect to man-made influences. It allows one to estimate the effects of uncertainties on the quality of the forecast. Implementation of the concept is connected with solutions of the direct, adjoint, and inverse problems for mathematical models of hydrodynamics, transport and transformation of substances and calculations of sensitivity relations for the functionals of atmospheric quality. Advantage of the proposed concept as compared with traditional prognostic technology is discussed.