

УДК 551.51+519.6

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РИСКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

В. В. Пененко, Е. А. Цветова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090 Новосибирск

Обсуждается проблема долгосрочного экологического прогнозирования с помощью математического моделирования с использованием доступной фактической информации о многолетней динамике климата. Описана методика количественных оценок риска/уязвимости на основе прямого и обратного моделирования и методов теории чувствительности. Приведены примеры расчетов областей риска для озера Байкал.

Ключевые слова: загрязнение природной среды, экологический риск, гидродинамика атмосферы, математическое моделирование.

Введение. Проблема долгосрочного экологического прогнозирования находится на стыке наук о биосферных и климатических процессах, формирование которых происходит при взаимодействии естественных и антропогенных факторов. События последних лет наглядно показали, что на современном этапе общественного развития экология в индустриально нагруженных регионах переходит в разряд важнейших социально-экономических и геополитических факторов. Действительно, с повышением технической сложности и удельной мощности энергетических и производственных объектов опасность крупномасштабных техногенных катастроф, как правило, не снижается. Эти катастрофы, в свою очередь, могут приводить к серьезным экологическим последствиям. Особенно остро весь комплекс проблем экологии может сказаться в сибирских регионах, где уже сложилась преимущественная ориентация хозяйства на развитие сырьевых отраслей промышленности и в перспективе намечается создание мощных энергетических комплексов с целью производства энергии на экспорт.

Угрожающими с экологической точки зрения выглядят также современные тенденции решения международных и внутренних конфликтов с применением опасных средств и систем вооружений и преднамеренным разрушением экологически опасных гражданских объектов. Кроме того, могут возникнуть и непреднамеренные последствия воздействий, как естественных, так и антропогенных нагрузок от источников тепла, влаги и загрязняющих примесей. А поскольку все эти события реализуются на фоне природных процессов различных пространственно-временных масштабов, возникает потребность в формулировании и решении нового класса задач — взаимосвязанных задач экологии и климата.

Фундаментальное значение в экологических исследованиях имеют понятия рисков и уязвимости территорий к естественным и антропогенным воздействиям. С их помощью

Работы выполнены при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Математического отделения РАН (код проекта 1.3.2.), Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 01-05-65313), Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации (контракт 37.011.11.0009), Европейской комиссии (код проекта ICA2-СТ-2000-10024) и в рамках Интеграционных проектов Сибирского отделения РАН (коды проектов 03-130, 03-131, 03-137, 03-138).

можно выявить потенциально опасные ситуации и объекты, количественно оценить степень тяжести возможных последствий катастрофических событий.

Специфика данного класса задач состоит в том, что необходимо рассматривать широкий спектр взаимодействующих процессов на длительных интервалах времени в областях различных масштабов при неопределенностях во внешних и внутренних источниках возмущений. Это требует, чтобы модели процессов и данные наблюдений, необходимые для их решения, использовались совместно в режиме прямых и обратных связей. Современные модели климатической системы, модели переноса и трансформации загрязняющих примесей в газовом и аэрозольном состояниях, составляющие теоретическую основу методов экологического прогнозирования, довольно сложны, поскольку в них должны быть учтены как естественные, так и антропогенные факторы, влияющие на изучаемые процессы [1–3]. Общие вопросы организации климатических моделей и их использование в изучении изменений климата изложены в работах [4, 5].

Поскольку множество процессов различных масштабов и разнородную фактическую информацию необходимо учитывать согласованно, численные модели и алгоритмы их реализации удобно строить на основе вариационных принципов в сочетании с методами расщепления и декомпозиции [6]. В этой роли вариационные принципы обеспечивают согласование различных элементов комплекса моделей, причем так, чтобы модели на всех этапах вычислений сохраняли смысл, заложенный в их исходных формулировках.

В настоящей работе представлена структура математических моделей и методов, предназначенных для решения диагностических и прогностических задач природоохранного направления. Различные аспекты антропогенных воздействий непосредственно учитываются в моделях через параметрическое описание источников тепла, влаги и загрязняющих примесей и изменений поверхности Земли на больших площадях. Используется методика построения детерминированных и детерминированно-стохастических оценок экологических рисков для областей-рецепторов, базирующаяся на прямом и обратном моделировании, теории чувствительности моделей и математической теории риска.

Модели атмосферных процессов. Исследуемые процессы описываются моделями гидротермодинамики в климатической системе, моделями переноса и трансформации влаги, химически и оптически активных загрязняющих примесей в газовом и аэрозольном состояниях. Функции источников в моделях учитывают действия естественных и антропогенных факторов. Чтобы рассматривать совместно модели процессов, систему мониторинга и совокупность функционалов с целью организации взаимодействия между ними в режиме прямых и обратных связей, будем предполагать, что все элементы комплекса (т. е. модели и наблюдения) могут содержать неопределенности и ошибки. В этом случае естественно ставить вопрос о конструировании алгоритмов для реализации таких связей исходя из условий минимизации некоторой меры неопределенностей и ошибок.

Рассмотрим модели из комплекса моделей климатоэкологической системы [7, 8], которые непосредственно связаны с процессами переноса тепла, влаги, оптически и химически активных субстанций в атмосфере

$$L\varphi \equiv \frac{\partial \pi \varphi_i}{\partial t} + \operatorname{div} \pi (\varphi_i u - \mu_i \operatorname{grad} \varphi_i) + \pi (H(\varphi))_i - \pi (f_i(\mathbf{x}, t) + r_i) = 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Здесь $\varphi = \{\varphi_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n}\} \in Q(D_t)$ — вектор-функция состояния. Ее компоненты φ_i описывают потенциальную температуру, отношения смеси вода — воздух для характеристик влажности в атмосфере (водяной пар, облачная вода, дождевая вода), концентрации загрязняющих примесей в газовом и аэрозольном состояниях; D_t — область изменения пространственных координат и времени; $\mathbf{f} = \{f_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n}\}$ — функция источников тепла, влаги и примесей; $\mathbf{r} = \{r_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n}\}$ — функции, описывающие неопределенности и ошибки

моделей; $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ — вектор скорости; $\mu_i = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)_i$ — коэффициенты турбулентного обмена для субстанции φ_i в направлении координат $\mathbf{x} = \{x_i, i = \overline{1, 3}\}$; вид функции π определяется структурой вертикальной координаты в области D_t ; $H(\varphi)$ — нелинейный матричный оператор, который описывает локальные процессы трансформации соответствующих субстанций. Он не содержит производных от функций состояния по \mathbf{x} и t . Если в модели учитываются процессы образования аэрозолей и их трансформация, то в этом случае добавляется еще одна переменная — размер частиц. Тогда оператор трансформации имеет по этой переменной интегродифференциальную структуру [9]. Функции \mathbf{u} , μ_i , f_i и входные данные начальных и краевых условий включаются в совокупность компонент вектора параметров \mathbf{Y} , принадлежащих области допустимых значений $R(D_t)$. Здесь используются структура областей и системы координат, подробно описанные в [8].

Начальные условия при $t = 0$ и параметры модели можно записать в виде

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

где φ_a^0 и \mathbf{Y}_a — заданные априорные оценки начальных полей φ^0 и вектора параметров \mathbf{Y} ; $\xi(\mathbf{x})$, $\zeta(\mathbf{x}, t)$ — ошибки и неопределенности начальных полей и параметров.

Граничные условия для замыкания модели определяются физическим содержанием изучаемой проблемы. Исходя из формы адвективно-диффузионных операторов в (1) их удобно представить в виде

$$\mu_n \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} + \alpha_i \varphi_i - g_i = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $\alpha_i = \alpha_i(\mathbf{x}, t, \varphi)$ — функции, определяющие поведение потоков субстанций на границах, в том числе режимы их взаимодействия с поверхностью Земли, а g_i — функции источников, заданных на границах Ω_t области D_t .

Все численные схемы и методы решения задач строятся с использованием вариационных принципов [6]. Для этих целей запишем вариационную формулировку комплекса моделей (1)–(3) в виде интегрального тождества

$$I(\varphi, \mathbf{Y}, \varphi^*) = \int (L(\varphi), \varphi^*) dD dt = 0, \quad (4)$$

где φ^* принадлежит пространству $Q^*(D_t)$, сопряженному по отношению к $Q(D_t)$. Интегральное тождество (4) преобразуется с учетом краевых и начальных условий так, чтобы при подстановке $\varphi^* = \varphi$ из него получалось соотношение баланса энергии исследуемой системы.

Выполнив, исходя из этого условия, все необходимые преобразования в (4) для модели (1)–(3), окончательно получим интегральное тождество

$$I(\varphi, \mathbf{Y}, \varphi^*) \equiv \sum_{i=1}^n \left\{ (\Lambda \varphi, \varphi^*)_i + \int_{D_t} ((H(\varphi))_i - f_i - r_i) \varphi_i^* \pi dD dt \right\} = 0. \quad (5)$$

Здесь

$$\begin{aligned} (\Lambda \varphi, \varphi^*)_i \equiv & \left\{ \int_{D_t} \left[\frac{1}{2} \left(\left(\varphi^* \frac{\partial \pi \varphi}{\partial t} - \varphi \frac{\partial \pi \varphi^*}{\partial t} \right) + (\varphi^* \operatorname{div} \pi \varphi \mathbf{u} - \varphi \operatorname{div} \pi \varphi^* \mathbf{u}) \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \pi \mu \operatorname{grad} \varphi \operatorname{grad} \varphi^* \right] dD dt + \frac{1}{2} \int_D \varphi \varphi^* \pi dD \Big|_0^{\bar{t}} + \int_{\Omega_t} \left(\frac{\varphi u_n}{2} + \alpha \varphi - g \right) \varphi^* \pi d\Omega dt \right\}_i \quad (6) \end{aligned}$$

(u_n — нормальная к границе составляющая вектора скорости). Вариационная формулировка (5), (6) используется для построения дискретных аппроксимаций модели.

Вопросы практической реализации базовых моделей природных процессов для использования в традиционных режимах прямого моделирования в настоящее время достаточно хорошо разработаны [1–3, 6]. Мы используем вариационную организацию моделей для того, чтобы на их основе построить комбинированные методы прямого и обратного моделирования для задач более высокого системного уровня, связанных с вопросами экологической безопасности и управления качеством природной среды [7, 10, 11]. Эти методы включают как основные элементы алгоритмы расчета функций чувствительности к вариациям входных данных, параметров и источников. Последние, в свою очередь, требуют решения ряда прямых и сопряженных задач. И все эти алгоритмические конструкции порождаются соответствующими вариационными принципами, в которых ключевую роль играет интегральное тождество вида (4).

Алгоритмы оценки рисков. Оценка экологических рисков и уязвимости территорий к антропогенным воздействиям — одна из типичных задач экологического прогнозирования и проектирования. Для задач этого класса мы используем комбинированные методы прямого и обратного моделирования и методы теории чувствительности моделей и обобщенных характеристик качества природной среды. Опишем кратко основную идею и схему ее реализации для практических целей.

Прежде всего определим набор оцениваемых характеристик в виде функционалов

$$\Phi_k(\varphi) = \int_{D_t} F_k(\varphi) \chi_k(\mathbf{x}, t) dD dt, \quad k = \overline{1, K}, \quad K \geq 1, \quad (7)$$

где $F_k(\varphi)$ — функции заданного вида, определенные и дифференцируемые на множестве значений функций состояния $Q(D_t)$; $\chi_k(\mathbf{x}, t) \geq 0$ — весовые функции, принадлежащие сопряженному пространству $Q^*(D_t)$; $\chi_k(\mathbf{x}, t) dD dt$ — соответствующие меры Радона и Дирака в D_t . Часть области $D_t^m \subset D_t$, в которой весовая функция задана ненулевыми значениями, будем называть рецептором, т. е. получателем возмущений, описываемых функцией $F_k(\varphi)$. При подходящем выборе функций $F_k(\varphi)$ и χ_k с помощью функционалов этого вида можно описать обобщенные характеристики поведения системы, экологические ограничения на качество природной среды, результаты наблюдений различных типов, критерии управления, критерии качества моделей и т. д. [10].

Построим для этой совокупности функционалов основные соотношения теории чувствительности, определяющие связи между вариациями $\delta\Phi_k(\varphi)$ и вариациями параметров моделей (см. [12]):

$$\begin{aligned} \delta\Phi_k^h(\varphi) &\equiv \frac{\partial}{\partial \varepsilon} I^h(\varphi, \mathbf{Y} + \varepsilon \delta\mathbf{Y}, \varphi_k^*)|_{\varepsilon=0} \equiv (\Gamma_k, \delta\mathbf{Y}) \equiv \sum_{i=1}^N \Gamma_{ki} \delta Y_i \equiv \\ &\equiv \sum_{i=1}^n \left\{ (\delta\Lambda\varphi, \varphi_k^*)_i + \int_{D_t} (\delta(H(\varphi)))_i - \delta f_i \varphi_{ki}^* \pi dD dt \right\}^h, \quad k = \overline{1, K}; \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\delta\Lambda\varphi, \varphi_k^*)_i &\equiv \left\{ \int_{D_t} \left(\frac{1}{2} (\varphi_k^* \operatorname{div} \pi \varphi \delta \mathbf{u} - \varphi \operatorname{div} \pi \varphi_k^* \delta \mathbf{u}) + \pi \delta \mu \operatorname{grad} \varphi \operatorname{grad} \varphi_k^* \right) dD dt + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \int_D \delta \varphi \varphi_k^* \pi dD \Big|_{t=0} + \int_{\Omega_t} \left(\frac{\varphi \delta u_n}{2} + \delta \alpha \varphi - \delta g \right) \varphi_k^* \pi d\Omega dt \right\}_i^h, \quad (9) \end{aligned}$$

где ε — вещественный параметр; $\delta\mathbf{Y} = \{\delta Y_i\}$ — вариации параметров моделей и источников внутренних и внешних воздействий; $\Gamma_k = \{\Gamma_{ki}\}$ — функции чувствительности

функционала $\Phi_k^h(\varphi)$ к этим вариациям, $k = \overline{1, K}$, $i = \overline{1, N}$; φ — решение основной задачи и φ_k^* — решение сопряженной задачи, соответствующей функционалу $\Phi_k^h(\varphi)$, которые порождаются вариационным принципом из условий стационарности сумматорного аналога расширенного функционала $\tilde{\Phi}_k^h(\varphi) = \Phi_k(\varphi) + I^h(\varphi, \varphi^*, \mathbf{Y})$ относительно произвольных независимых вариаций функций φ и φ^* в узлах сеточной области D_t^h . Верхним индексом h отмечены дискретные аналоги соответствующих объектов. Операции дискретизации применяются также ко всем функциональным аргументам и к пространственно-временным областям. Алгоритмы построения основного соотношения и функций чувствительности в задачах рассматриваемого класса описаны в [6, 7].

Особо следует отметить выражения в формулах (8), (9), содержащие источники тепла, влаги и примесей. Множители, стоящие при вариациях источников δf_i и δg_i , суть соответствующие им функции чувствительности (ФЧ). Они являются мерой непосредственного влияния вариаций источников на значения вариаций функционала (в линейных задачах — влияния самих источников на значение функционала).

ФЧ функционалов (7) по отношению 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 интерпретировать как области наблюдаемости территории с помощью системы мониторинга, расположенной в области-рецепторе. Используя терминологию теории дифференциальных уравнений, их можно также назвать областями зависимости и областями влияния для значений функций состояния модели (1)–(3) в рецепторе.

Информационный смысл функции опасности для функционалов, определяющих качество атмосферы в рецепторе, можно описать следующим образом. Ее значение в точке $(\mathbf{x}, t) \in D_t$ — величина относительного вклада выброса загрязнений от источника, расположенного в этой точке (в интервале времени его действия), в представленное значение функционала суммарное количество загрязнений, поступающих в атмосферу рецептора за период наблюдений. Поэтому соотношения чувствительности и ФЧ содержат количественную информацию для измерения степени экологических рисков для зоны-рецептора и показывают характер ее уязвимости к возмущениям от потенциально опасных источников.

ФЧ рассчитываются через решения основных и сопряженных задач для модели (1)–(3) с невозмущенными значениями входных данных и поэтому имеют детерминированный характер. Вариации же параметров, начальных и граничных условий и источников могут быть как детерминированными, так и случайными. Для источников появление вариаций можно связать с возможностью возникновения нестандартных ситуаций. А такие ситуации, если они не стимулируются целенаправленно, как правило, имеют случайный характер.

Для количественной оценки экологических рисков введем некоторые пороговые значения величин вариаций функционалов (7). Обозначим их через Δ_k^s , $k = \overline{1, K}$. Тогда условия, при которых выполняются неравенства

$$|\delta\Phi_k| \leq \Delta_k^s, \quad (10)$$

можно условно считать экологически благополучными, а условия, при которых они нарушаются, — ситуациями экологического риска.

Из соотношений чувствительности (8) следует, что при рассчитанных ФЧ и при наличии количественной информации о вариациях параметров проверка неравенств “экологического благополучия” (10) не вызывает принципиальных затруднений. Действительно, в

случае детерминированных вариаций источников и параметров диапазон вариаций функционалов можно вычислить по формулам

$$|\delta\Phi_k| \leq \sum_{i=1}^N |\Gamma_{ki}| |\delta Y_i|. \quad (11)$$

Оценки вариаций функционалов при вариациях параметров и источников, имеющих случайный характер, несколько усложняются по сравнению с детерминированным вариантом возмущений, поскольку приходится работать с многомерными пространствами ФЧ и параметров. Рассмотрим один из подходов к получению требуемых оценок в детерминированно-стохастическом случае на базе методов теории чувствительности [12] и математической теории риска [13].

Вычисления организуются так, что векторы чувствительности зависят только от невозмущенных значений параметров и вектора состояния. Поэтому для конкретных ситуаций Γ_k можно считать неслучайными. Учитывая свойства математического ожидания и ковариационных матриц при линейных преобразованиях случайных векторов, получим следующие оценки для математического ожидания $E(\delta\Phi) = \sum_{i=1}^N \Gamma_i E(\delta Y_i)$ и для дисперсии

$D(\delta\Phi) = (D(\delta\mathbf{Y})\mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Gamma})$ вариации функционала $\delta\Phi$. В соответствии с (8) вариация функционала $\delta\Phi$ теперь определяется как линейная комбинация случайных величин. Если число N достаточно велико и среди компонент вектора $\delta\mathbf{Y}$ нет сильно отличающихся от нормального распределения, то на основании центральной предельной теоремы теории вероятностей [14] можно предположить, что закон распределения величины $\delta\Phi$ стремится к нормальному. Предположение о нормальности закона распределения существенно упрощает задачу, поскольку для полной характеристики этого распределения достаточно знать его математическое ожидание $E(\delta\Phi)$ и дисперсию $D(\delta\Phi)$ или соответствующую ковариационную матрицу.

Используя значения $E(\delta\Phi)$ и $D(\delta\Phi)$ и предположение о нормальности закона распределения $\delta\Phi$ как случайной величины с плотностью распределения $f(x) = e^{-(x-E(x))^2/2D(x)} / \sqrt{2\pi D(x)}$, $x \equiv \delta\Phi$, можно получить ряд числовых характеристик оценки функционала $\Phi(\varphi)$. Методика построения этих оценок в настоящее время достаточно развита [15]. Мы используем результаты работ [6, 12].

В частности, представляют интерес вероятности выполнения неравенств (11), выражающих условия попадания изучаемой ситуации в категорию экологически безопасной:

$$R^s = P(|\delta\Phi| \leq \Delta^s), \quad (12)$$

где P — вероятность попадания нормально-распределенной величины $\delta\Phi$ с плотностью $f(x)$ в интервал безопасности Δ^s .

Если же задать некоторый приемлемый уровень значений вероятности надежности R^s , то по нему можно определить параметр “надежности” λ оценки (12) и рассчитать диапазон “безопасности”

$$|\Delta^s - E(\delta\Phi)| = \lambda \sqrt{D(\delta\Phi)}.$$

В задачах экологического проектирования [10], в дополнение к оценкам ситуации в целом, необходимо рассматривать и возможные наихудшие сценарии для качества атмосферы в зоне-рецепторе [11]. С этой целью выявляются области локальных максимумов рассчитанных ФЧ и области расположения источников большой потенциальной мощности (в смысле эмиссии загрязняющих примесей). При совпадении этих областей возможно возникновение ситуаций высокого экологического риска/уязвимости. В таких случаях

требуются более детальные исследования, например проведение сценариев прямого моделирования с заданным набором источников и различными вариантами эмиссий.

О базовых моделях гидродинамики атмосферы, переноса и трансформации примесей. Для практической реализации предлагаемой концепции экологического прогнозирования разработаны структура и принцип построения комплекса моделей системы “атмосфера индустриального региона”, ориентированного на проведение исследований по формированию мезоклиматов в регионе на фоне крупномасштабных процессов, а также процессов переноса и трансформации загрязняющих примесей. В этой концепции регион рассматривается как элемент глобальной климатической системы, выступающий и как источник, и как получатель загрязнений. В качестве объектов исследований выбраны Западно-Сибирский и Восточно-Сибирский регионы Сибирского федерального округа.

В соответствии с принятой концепцией комплекс моделей строится по иерархическому принципу так, чтобы в нем участвовали базовые модели нескольких масштабов: локальная, мезомасштабная, региональная, полусферная и глобальная модели атмосферы. Каждая модель включает описание процессов гидротермодинамики и переноса и трансформации примесей от естественных и антропогенных источников. Для организации взаимодействия моделей с фактической информацией и для задания критериев качества и ограничений, накладываемых на решения, вводятся функционалы обобщенных характеристик с мерами Радона и Дирака, определенные на множествах функций состояния и данных измерений. Согласованное описание всех моделей и процессов по функциональному содержанию и построение адекватной им структуры численных схем и вычислительных алгоритмов обеспечивает вариационный принцип. Его применение дает единую конструктивную основу для всей технологической цепочки математического моделирования — от построения дискретных аналогов моделей исследуемых процессов до системной организации алгоритмов прямого и обратного моделирования и оптимизационных процедур. Как следствие вариационного принципа при исследовании чувствительности моделей к вариациям входных данных и при получении оптимальных оценок функционалов, определенных на множестве функций состояния этих моделей, получаются сопряженные задачи для моделей процессов. Соотношения теории чувствительности являются многоцелевым и весьма полезным инструментом исследований моделей и процессов. С позиций экологической безопасности они дают количественную информацию для оценок степени экологического риска для региона — получателя своих и “чужих” загрязнений, а с позиций мониторинга показывают степень информативности системы наблюдений и возможности идентификации источников антропогенных воздействий. Для организации методов обратного моделирования они являются конструктивными элементами при реализации обратных связей от целевых функционалов к искомым характеристикам.

Формирование долгосрочных сценариев для оценок экологической перспективы. Задачи экологического прогнозирования имеют еще одну существенную специфическую черту, а именно: их всегда приходится решать с учетом неопределенности в поведении климатической системы и в характере воздействий антропогенных факторов. Если принять гипотезу об относительной устойчивости климата на протяжении 50–100 лет, то для построения экологических прогнозов можно воспользоваться сценарным подходом. Гипотеза об относительной устойчивости климата подразумевает, что его изменения, если таковые имеют место, реализуются постепенно и диапазон изменений много меньше, чем осредненные за многолетний период значения основных климатических параметров. При стратегии сценарного подхода необходимо выбрать подходящую совокупность сценариев, учитывающую типичные и экстремальные ситуации, с позиций как климатических изменений, так и возможных направлений хозяйственной деятельности. Для каждого такого сценария делается свой экологический прогноз, и совокупность сценариев анализируется

в целом с помощью методов факторного анализа. Заметим кстати, что реализация серии сценарных прогнозов позволяет наиболее эффективно использовать современные вычислительные технологии параллельных вычислений.

Методы факторного анализа расширяют возможности математических моделей для изучения природных процессов [16, 17]. Они позволяют представить совокупности данных о многолетней динамике изучаемых процессов в виде полной системы ортогональных подпространств, упорядоченных по мере убывания их информативности в соответствии с заданными критериями [18]. Наиболее информативную часть этих подпространств обычно относят к категории главных факторов.

С помощью главных факторов эффективно решаются следующие задачи:

малокомпонентное представление исходной совокупности векторов с заданной степенью информативности; исследование межгодовой и внутрисезонной изменчивости процессов;

выделение центров действия в климатической системе, идентификация их пространственного расположения и изучение изменчивости; изучение их взаимосвязей с областями экологических рисков/уязвимости;

типизация многолетней динамики исследуемой системы в соответствии с интенсивностью факторных нагрузок относительно главных факторов; выделение типичных и аномальных ситуаций;

формирование информативных фазовых подпространств для организации детерминированно-стохастических сценариев на базе моделей гидротермодинамики и переноса примесей.

Использование информации о главных факторах в экологических исследованиях позволяет эффективно решать вопросы выбора методов для описания метеорологических ситуаций, на фоне которых формируются долговременные процессы переноса и трансформации влаги и загрязняющих веществ. Анализ главных факторов глобального и регионального масштабов совместно с анализом функций чувствительности и областей влияния для моделей и функционалов показывает, что адекватно воспроизводить динамику региональных процессов невозможно без учета их взаимосвязей с глобальными процессами. Это отчетливо проявляется, например, при оценке областей экологических рисков и уязвимости к антропогенным воздействиям для изучаемого региона.

Исходя из этих предпосылок технология моделирования организуется на принципах комплексирования результатов, полученных с помощью моделей различных масштабов и декомпозиции функции состояния по масштабам на фоновые процессы и возмущения. Суть этой технологии состоит в следующем. В модели вводятся новые элементы — направляющие фазовые пространства. Это многокомпонентные поля пространственно-временной структуры, обеспечивающие описание фоновых процессов с заданной степенью информативности по отношению к наблюдаемым состояниям глобальной климатической системы в соответствии с типизацией по главным факторам. Для выделения подпространств главных факторов и формирования направляющих фазовых пространств мы используем базу данных Реанализа NCEP/NCAR, которая представляет многомерную динамику глобальной климатической системы с 1950 по 2002 г. с дискретностью 12 ч [19].

Детальная структура полей рассчитывается с помощью комплекса математических моделей. Для региональных исследований используются синхронно глобальная и региональные модели [8]. Комплексирование моделей различных масштабов и учет в них направляющих фазовых пространств осуществляются в темпе моделирования на каждом временном шаге с помощью вариационного принципа минимизации суммарной меры неопределенностей в моделях и данных. Здесь важно, чтобы все информационные массивы были представлены на согласованных по структуре сеточных областях. Это упрощает процедуры вложения без потери информативности и точности представления полей.

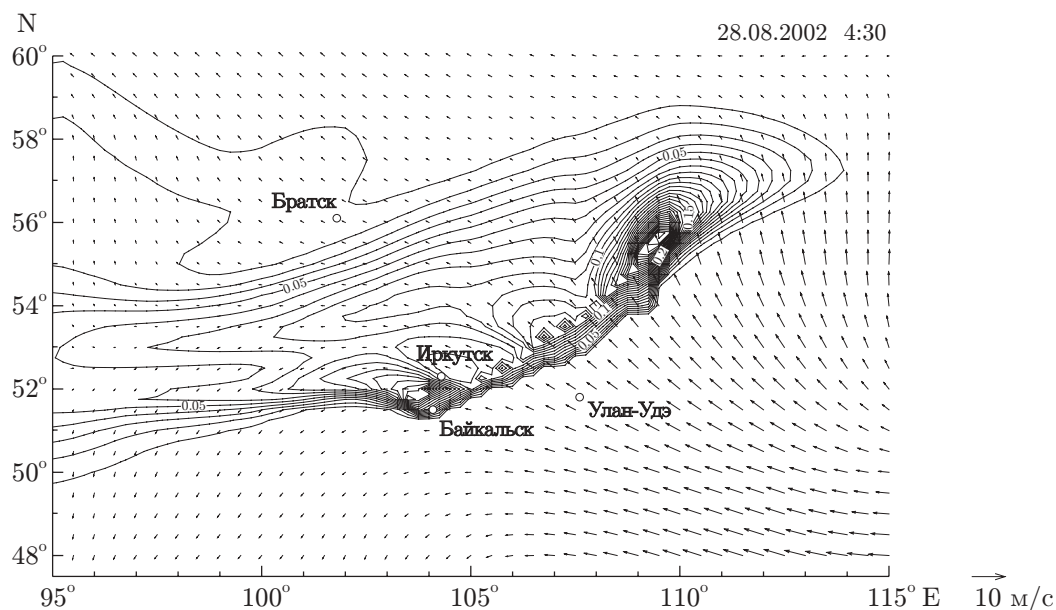


Рис. 1

Оценка риска для озера Байкал. Разрабатываемый комплекс моделей используется для решения научных и практических задач по оценке экологической перспективы индустриальных регионов.

Приведем пример сценария обратного моделирования. Его цель — понять, до какой степени озеро Байкал и окружающие территории в регионе подвержены воздействию антропогенных источников, и оценить степень экологического риска для озера получить загрязнения от действующих и потенциально возможных источников. С использованием решения сопряженных задач в режиме обратного моделирования рассчитываются ФЧ функционала качества атмосферы. Этот функционал формируется следующим образом. Область над озером задается как носитель ненулевых значений весовой функции в (7) и $F_k(\varphi) \equiv \varphi$. Функция φ описывает концентрацию пассивной газовой примеси в регионе. Функционал представляет суммарное количество загрязнений, которое может поступить в атмосферу над озером в течение месяца от действующих и потенциально возможных источников. Сценарий рассчитан для августа 2002 г. Гидродинамическая часть сценария формируется с использованием данных [19]. Динамика четырехмерных полей метеоэлементов рассчитывается с 1 по 31 августа 2002 г. с дискретностью 30 мин по времени в области $47,5 \div 60^\circ$ с.ш. и $95 \div 115^\circ$ в.д. на широтно-долготной сетке с шагами $15'$ в каждом направлении. Разрешение по вертикали — 19 уровней в гибридных координатах [8] от поверхности Земли до уровня, соответствующего давлению 10 мбар.

На рис. 1 и 2 приводятся поля скоростей на верхней границе приземного слоя (стрелки) и ФЧ к вариациям мощности источников, расположенных на поверхности Земли в регионе и за его пределами (относительные единицы). ФЧ — это четырехмерный агрегат пространственно-временной структуры. На рисунках представлены двумерные фрагменты, относящиеся к двум моментам времени — 28 августа (рис. 1) и 6 августа (рис. 2). Значения функции чувствительности показывают, какая часть суммарной эмиссии от действующих и потенциально возможных источников может поступить в приземный слой атмосферы. Чем больше значение ФЧ, тем больше риск получить загрязнение. Рисунки демонстрируют высокую изменчивость ФЧ по пространству и времени. Так, на рис. 1 видно,

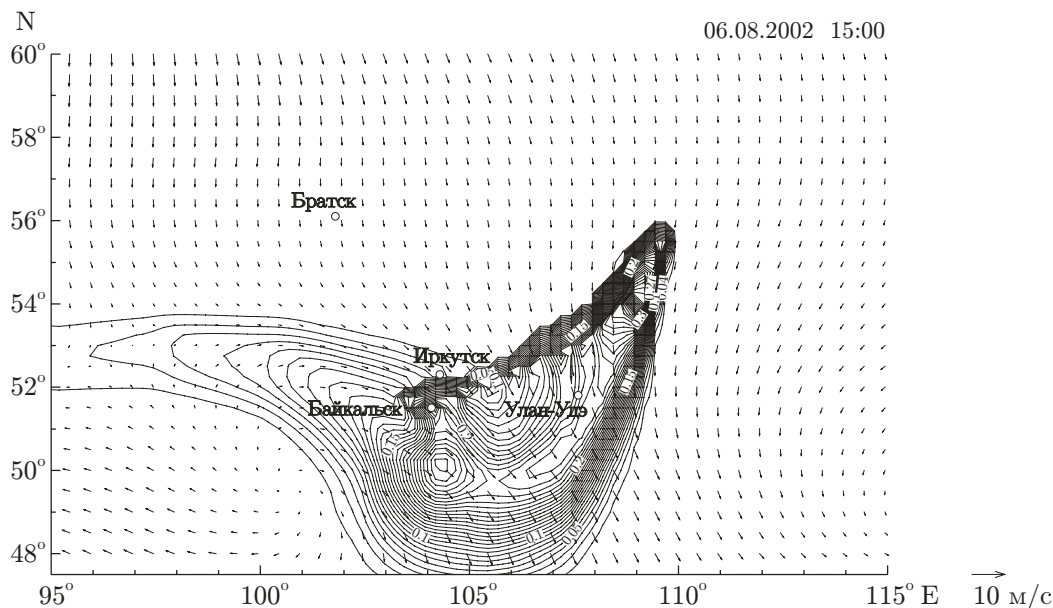


Рис. 2

что загрязнения могут поступить с северо-западного направления. Интересно, что выделяются центры локальных максимумов в областях, характеризующихся высоким уровнем антропогенных нагрузок — Иркутск, Ангарск и др. На рис. 2 зоны риска находятся как на северо-западе, так и на юго-востоке, т. е. не исключено влияние Байкальского целлюлозного комбината и других промышленных объектов этого региона. Кроме того, значительная часть области риска попадает на территорию Монголии. Анализируя байкальские сценарии, можно сделать вывод, что зоной риска для озера являются индустриально нагруженные территории Восточно-Сибирского региона.

Информация, которую дает ФЧ, может быть полезна при планировании хозяйственной деятельности и экологическом прогнозировании и проектировании. Отметим еще одно полезное применение ФЧ для организации систем мониторинга за качеством природной среды. Геометрическая конфигурация носителя ФЧ является характеристикой области наблюдаемости территорий региона с помощью систем измерений, размещенных в областях-рецепторах. В этом случае значения ФЧ представляют собой меру информативности наблюдений по отношению к источникам. Это значит, что по наблюдениям из области-рецептора можно с помощью решения обратных задач и рассчитанных ФЧ обнаруживать местоположение источников специфических загрязнителей и идентифицировать их параметры.

Заключение. Предложена методика расчета экологических рисков и уязвимости на основе вариационных принципов и комбинации методов прямого и обратного моделирования, методов теории чувствительности и многомерного факторного анализа. Методика легко адаптируется к анализу конкретных ситуаций. Но чтобы получить решение проблемы риска/уязвимости с позиций экологического прогнозирования необходимо учитывать особенности реального поведения климатической системы и неопределенности, присущие данному классу задач. Для этих целей предложен сценарный подход с использованием комплекса моделей и методов многомерного и многокомпонентного факторного анализа, позволяющих выделять наиболее существенные, типичные и экстремальные ситуации в режиме межгодовой и межсезонной изменчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марчук Г. И.** Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982.
2. **Марчук Г. И.** Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М.: Наука, 1992.
3. **Пененко В. В., Алоян А. Е.** Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985.
4. **Израэль Ю. А., Груза Г. В., Катцов В. М., Мелешко В. П.** Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий // Метеорология и гидрология. 2001. Т. 14, № 5. С. 5–21.
5. **Дымников В. П., Володин Е. М., Галин В. Я. и др.** Климат и его изменения: математическая теория и численное моделирование // Сиб. журн. вычисл. математики. 2003. Т. 6, № 4. С. 347–379.
6. **Пененко В. В.** Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
7. **Пененко В. В., Цветова Е. А.** Некоторые аспекты решения взаимосвязанных задач экологии и климата // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 5. С. 161–170.
8. **Пененко В. В., Цветова Е. А.** Математические модели для исследования взаимодействий в системе озеро Байкал — атмосфера региона // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 2. С. 137–147.
9. **Seinfeld J.** Atmospheric chemistry and air pollution. N. Y.: Wiley Intersci. Publ., 1986.
10. **Пененко В. В.** Численные модели и методы для решения задач экологического прогнозирования и проектирования // Обзорение прикл. и пром. математики. 1994. Т. 1, № 6. С. 917–941.
11. **Пененко В. В.** Выявление областей повышенной экологической уязвимости: концепция и подходы к реализации // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14, № 6/7. С. 596–600.
12. **Пененко В. В., Цветова Е. А.** Методы и модели для изучения природной среды и оценки экологических рисков // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15, № 5/6. С. 412–418.
13. **Grandel J.** Aspects of risk theory. N. Y.: Springer-Verlag, 1992.
14. **Рао С. Р.** Линейные статистические методы и их применение. М.: Наука, 1968.
15. **Липцер Р. Ш., Ширяев А. Н.** Статистика случайных процессов. М.: Мир, 1972.
16. **Харман Г.** Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972.
17. **Preisendorfer R. W.** Principle component analysis in meteorology and oceanography. Amsterdam; N.Y.; Tokyo: Elsevier, 1988.
18. **Пененко В. В., Цветова Е. А.** Главные факторы климатической системы глобального и регионального масштабов и их применение в экологических исследованиях // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16, № 5/6. С. 407–414.
19. **Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al.** The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.

Поступила в редакцию 17/XI 2003 г.