

В.В. Пененко

Выявление областей повышенной экологической уязвимости: концепция и подходы к реализации

ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 12.02.2001 г.

На основе исследований, выполненных с помощью математического моделирования и анализа фактической информации о глобальной климатической системе, обнаружены области повышенной уязвимости по отношению к антропогенным воздействиям. Эти области выделяются высокой чувствительностью качества атмосферы к вариациям источников загрязняющих примесей.

Представленный результат получен с помощью разрабатываемой методики решения взаимосвязанных задач экологии и климата. Методика базируется на применении вариационных принципов и комбинации методов прямого и обратного моделирования и методов теории чувствительности. Используются модели переноса и трансформации примесей полусферного и регионального масштабов, а также модели гидротермодинамики информационного типа, с помощью которых по данным из архива Reanalysis NCEP/NCAR США в режиме усвоения строятся сценарии атмосферной циркуляции.

Введение

Оценки экологической перспективы промышленных регионов в условиях антропогенных воздействий представляют в настоящее время активно развивающуюся область интеграционных исследований специалистов различных направлений. Задачи, возникающие в таких исследованиях, принадлежат классу взаимосвязанных задач экологии и климата. К ним можно отнести проблемы качества атмосферы, региональных проявлений глобальных изменений, экологическое проектирование, прогнозирование рисков от антропогенных воздействий и т.д. Интерес к этим исследованиям постоянно стимулируется тем фактом, что их результаты имеют непосредственный практический выход в сферу социально-экономических отношений современного общества.

Для решения этого класса задач требуются специальные методы и технологии моделирования, основанные на совместном использовании математических моделей и фактических данных о реально наблюдаемых процессах в природной среде. Здесь излагается концепция построения такой методики. Теоретически она базируется на вариационных принципах, которые, в свою очередь, порождают методы прямого и обратного моделирования и методы теории чувствительности [1–4].

Математические модели учитывают процессы гидротермодинамики в климатической системе, процессы переноса и трансформации примесей. Они позволяют с определенной степенью точности и предсказуемости воспроизводить детальную картину реальных ситуаций. Данные наблюдений составляют основу для построения «направляющих» подпро-

странств для привязки моделей к конкретным ситуациям и объектам и идентификации их параметров.

Описание проблемы. Вариационный принцип

В статье рассматриваются вопросы, связанные с проблемой оценок экологических рисков, возникающих под воздействием источников тепла, влаги и загрязняющих примесей естественного и антропогенного происхождения. Побудительные мотивы к постановке задач состоят в следующем.

Исследования по изучению механизмов формирования мезоклиматов и качества атмосферы в городах и промышленных регионах показывают, что при определенных условиях получают ситуации, которые можно интерпретировать как предпосылки экологических катастроф [5, 6]. Это, в частности, ситуации с образованием инверсий и зон накопления загрязняющих примесей в системе «город–окрестности–вода–суша». Действие этих факторов обостряется в условиях горного рельефа. Сложные ситуации возникают также в районах размещения объектов горнодобывающих предприятий с открытым способом разработки минеральных ресурсов в межгорных котловинах и глубоких карьерах.

При моделировании крупномасштабных процессов проявление экологически неблагоприятных ситуаций выражается не так ярко. Причин тому много, но одна из них обнаруживается просто. Она состоит в недостаточном разрешении численных моделей, чтобы учесть и адекватно описать влияние локальных и мезомасштабных факторов на фоне глобальных. Заметим, что речь идет о разрешении не только в области

пространственно-временных переменных, но и в области допустимых значений параметров.

С помощью традиционных подходов методами прямого моделирования оценить масштабы взаимодействий в климатической системе с фокусировкой на конкретные регионы, обнаружить области экологической уязвимости и оценить степень риска для них от последствий антропогенных воздействий весьма проблематично. В таких задачах методы обратного моделирования пока вне конкуренции [2–4]. В комбинации с методами прямого моделирования они открывают новые перспективы к расширению класса задач и к организации интерактивных технологий. По своей сути, методы обратного моделирования имеют диагностический характер. Их ценность состоит в том, что они работают в направлении от результата к источникам и причинам этого результата. Одним из продуктов обратного моделирования являются функции чувствительности, которые позволяют качественно и количественно оценить реакцию системы на изменения внешних воздействий.

С помощью разрабатываемой на этих принципах в ИВМиМГ СО РАН технологии моделирования выполнена серия численных экспериментов по анализу масштабов взаимодействий в климатической системе и по оценке информативности систем мониторинга. Сценарии были организованы так, что определенные регионы участвовали в климатической системе как источники возмущений (ЧАЭС [7], Сербия [4, 8], Норильск, Новая Земля) и как реципиенты, т.е. получатели загрязнений от других территорий (Байкал [9], Западная Сибирь [10], Арктика, Япония). Атмосферная циркуляция восстанавливалась по данным реанализа [11] с помощью системы [12].

Анализ результатов сценариев прямого моделирования показал, что в северном полушарии имеются области, размещение в которых экологически опасных источников представляет высокую степень потенциальной угрозы загрязнения значительных территорий. По сценариям обратного моделирования видно, что существуют также области-реципиенты, обладающие повышенной экологической уязвимостью по отношению к воздействиям источников, расположенных как на своей, так и на чужих территориях. Рассчитанные для них функции опасности имеют существенно большие пространственно-временные масштабы, чем для других регионов. В частности, одной из таких областей является, по нашим оценкам, область, включающая Приморье и Японию.

Таким образом, возникла новая задача. Суть ее состоит в том, чтобы создать методику выявления областей повышенной экологической опасности и уязвимости по отношению к антропогенным воздействиям. Методика должна быть применима для оценок как в краткосрочной перспективе, так и на климатически значимых интервалах времени. Отработка методики осуществлялась на базе вариационного подхода применительно к моделям переноса тепла, влаги и загрязняющих примесей в климатической системе. Для формиро-

вания информативных подпространств и сценариев моделирования используем базу данных реанализа [11].

Рассмотрим совокупность моделей вида

$$L\boldsymbol{\varphi} \equiv \left\{ \frac{\partial \pi \varphi_i}{\partial t} + \operatorname{div} \pi(\mathbf{u}\varphi_i - \mu_{\varphi_i} \operatorname{grad} \varphi_i) - R_{\varphi_i} - S_{\varphi_i} - \varepsilon_{\varphi_i} = 0 \right\}, \quad i = \bar{1}, \bar{na}, \quad na \geq 1, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\varphi} = \{\varphi_i, i = \bar{1}, \bar{na}\}$ – вектор-функция состояния системы. Его компоненты – скалярные функции, представляющие собой потенциальную температуру, характеристики влажности, поля концентраций загрязняющих примесей в атмосфере; na – общее число функций состояния. Функции R_{φ_i} описывают скорости локальных изменений соответствующих субстанций. Для температуры в них учитывается дивергенция радиационных потоков тепла, для характеристик влажности – микрофизические процессы превращения влаги, для примесей – процессы фотохимической и химической трансформации веществ. Функции S_{φ_i} описывают источники и стоки тепла и материальных субстанций естественного и антропогенного происхождения. Дополнительные слагаемые ε_{φ_i} вводятся в (1) для учета возможных ошибок и неопределенностей в описании соответствующих процессов. Если модели и входные данные предполагаются точными, то эти слагаемые исключаются.

Модели (1) записываются в следящих за рельефом поверхности сигма-координатах на сферической Земле, по горизонтали принимаются сферические координаты, а по вертикали – гибридная координата с декомпозицией области на две подобласти [9]; \mathbf{u} – вектор скорости в этой системе координат; π – функция, зависящая от давления, которая определяется с учетом декомпозиции области по вертикали. Модели замыкаются краевыми условиями. На верхней границе воздушной массы задаются условия на потоки субстанций, а на нижней – условия взаимодействия субстанций с подстилающей поверхностью в рамках моделей приземного и пограничного слоев [9]. Для формулировки вариационного принципа и организации системы моделирования задается совокупность функционалов

$$\Phi_k(\boldsymbol{\varphi}) = \int_{D_t} F_k(\boldsymbol{\varphi}) \chi_k(\mathbf{x}, t) dD dt, \quad k = \bar{1}, \bar{nk}, \quad nk \geq 1, \quad (2)$$

представляющих собой обобщенные оценки поведения исследуемых процессов. В формуле (2) $F_k(\boldsymbol{\varphi})$ – заданные функции в пространстве значений функций состояния; $\boldsymbol{\varphi} \in Q(D_t)$, $D_t = D \times [0, \bar{t}]$, где D – область пространственных координат; $[0, \bar{t}]$ – интервал изменения времени; $\chi_k(\mathbf{x}, t) \geq 0$ – весовые функции, $\chi_k(\mathbf{x}, t) dD dt$ – соответствующие им меры Радона в области D_t [13]. Функции $F_k(\boldsymbol{\varphi})$ предполагаются дифференцируемыми относительно $\boldsymbol{\varphi}$. Они содержат

рассчитанные с помощью моделей (1) и полученные в измерениях значения функций состояния.

Применительно к целям мониторинга и климато-экологических оценок носитель каждой весовой функции χ_k в (2) можно интерпретировать как область-реципиент последствий от воздействий, реализуемых в климатической системе и описываемых посредством функций $F_k(\Phi)$. Сами воздействия параметрически задаются через функции источников в (1), а также через краевые и начальные условия. Обозначим $\mathbf{Y} = \{Y_i, i = \overline{1, N}\}$ всю совокупность входных данных, параметров и источников, участвующих в моделях (1) и используемых в сценариях моделирования. Предположим, что они принадлежат области допустимых значений $Y \in R(D_t)$.

Основной элемент вариационного принципа представляет описание моделей (1) с помощью интегрального тождества следующего вида:

$$I(\Phi, \Phi', \mathbf{Y}) \equiv \int_{D_t} (L\Phi, \Phi') dD dt = 0, \quad (3)$$

где Φ' – произвольные достаточно гладкие функции из пространства $Q'(D_t)$, сопряженного к пространству $Q(D_t)$. Скалярное произведение в подынтегральном выражении в (3) строится так, чтобы при определенном выборе функции Φ' из тождества (3) следовало энергетическое соотношение для модели (1).

Основное соотношение чувствительности для совокупности функционалов (2) строится в рамках вариационного принципа с помощью алгоритма [3]:

$$\begin{aligned} \delta\Phi_k^h(\Phi) &= (\text{grad}_{\mathbf{Y}} \Phi_k^h(\Phi), \delta\mathbf{Y}) \equiv \\ &\equiv \frac{\partial}{\partial \xi} I^h(\Phi, \Phi', \mathbf{Y} + \xi\delta\mathbf{Y}) \Big|_{\xi=0}. \end{aligned} \quad (4)$$

В свою очередь, соотношение (4) порождает алгоритм для нахождения функций чувствительности $\text{grad}_{\mathbf{Y}} \Phi_k^h(\Phi)$ по отношению к вариациям $\delta\mathbf{Y}$ вектора параметров \mathbf{Y} . Индекс h отмечает дискретный аналог, а символ δ – вариации соответствующих объектов; ξ – вещественный параметр.

Функции Φ и Φ' в (4) считаются заданными. Они получаются из решения основной и сопряженной задач при невозмущенных значениях параметров \mathbf{Y} . Сами эти задачи получаются из вариационного принципа и алгоритмически следуют из условий стационарности расширенных функционалов [1,3]:

$$\tilde{\Phi}_k^h(\Phi, \Phi', \mathbf{Y}) \equiv \{\Phi_k^h(\Phi) + I^h(\Phi, \Phi', \mathbf{Y})\} \quad (5)$$

при произвольных и независимых вариациях функций Φ и Φ' в узлах сеточной области D_t^h соответственно.

Функции чувствительности дают новое качество в изучении прямых и обратных связей в моделируемой системе. Их поведение характеризуется высокой

пространственно-временной изменчивостью. Однако с информационной точки зрения они вносят в процесс моделирования большую избыточность. Анализ же необходимо осуществлять совместно с функциями состояния. Поэтому чтобы обнаружить в этом многокомпонентном наборе многомерных функций искомые зависимости, требуются специальные методы. С этой целью объединяются алгоритмы теории чувствительности с методами факторного анализа. Общее описание факторных алгоритмов для рассматриваемого здесь класса задач дано в [14]. Принципиальную роль в них играет выбор скалярного произведения для формирования матрицы Грама для исходной совокупности многокомпонентных векторов, порождаемых дискретными аналогами моделей (1), соотношениями чувствительности (4) и базами данных о состоянии климатической системы.

Если рассматривать применение моделей с точки зрения факторного анализа, то выражение (3) содержит определение скалярного произведения в пространстве функций состояния, а выражение (4) – скалярное произведение в пространстве функций чувствительности. Сумма этих функционалов дает выражение для скалярного произведения на объединении обоих пространств. После определения скалярных произведений алгоритмы факторного анализа реализуются стандартным путем в соответствии со схемой, описанной в [14].

Далее, зоны повышенной опасности и уязвимости ищутся среди главных факторов, которые обнаруживаются в поведении функций состояния климатической системы, описываемой архивными данными, в поведении функций состояния модели (1) и функций чувствительности, связывающих вариации исследуемых функционалов (2) с вариациями источников и входных параметров модели (1).

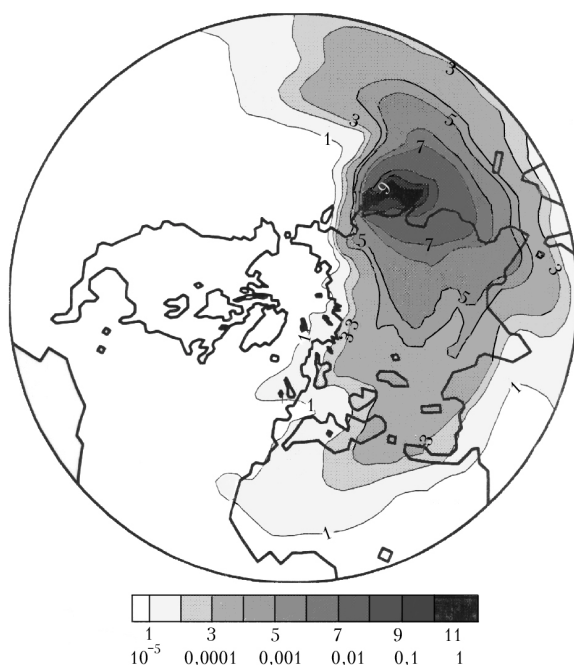
Пример зоны повышенной экологической уязвимости

Для иллюстрации возможностей выявления зон повышенной экологической уязвимости приведем пример результата численного моделирования по изучению качества атмосферы конкретного региона – Японии. Об этом примере упоминалось выше. Расчеты выполнены Е.А. Цветовой.

В данном случае оценивался функционал из совокупности (2) с весовой функцией, носитель ненулевых значений которой задается по конфигурации архипелага Японских островов на уровне подстилающей поверхности. Сценарий реализован с помощью модели вида (1) в режиме обратного моделирования с 24.03 по 24.04.1999 г. Функционал оценивался в интервале времени 14–24.04.1999 г. Атмосферная циркуляция восстанавливалась по архивным данным из [11] за этот же период времени с помощью модели гидротермодинамики с дискретностью по времени 30 мин. Использовалась 20-уровневая версия модели в «гибридных координатах» по вертикали [9, 12].

По физическому смыслу суть численного эксперимента состояла в оценке суммарного загрязнения, поступающего в приземный слой воздуха над Японией в течение 10 сут в период 14–24.04.1999 г. от источников, расположенных на территории северного полушария Земли в период с 24.03 по 24.04.1999 г. Одновременно требовалось оценить степень экологического риска получения загрязнений от каждого из действующих и проектируемых источников на этой территории.

Решение задачи находится с помощью вариационного принципа для оцениваемого функционала (2) при ограничениях, задаваемых математическими моделями (1), (3). Значения функции чувствительности функционала к вариациям источников примесей, взятые в местах расположения источников, дают требуемые оценки рисков, т.е. относительного вклада каждого источника в суммарное значение функционала (2). На рисунке показана функция чувствительности



Нормированная функция чувствительности для оценок экологического риска загрязнения атмосферы Японии от источников, расположенных на поверхности Земли

к источникам, расположенным на поверхности Земли, в относительных единицах в соответствии со шкалой значений. Конфигурация области и распределение уровней значимости свидетельствуют о высокой степени потенциальной опасности даже удаленных на большие расстояния от Японии, но мощных по интенсивности эмиссии источников возмущений. Эта экологическая ситуация возникла из-за того, что регион расположен в районе контраста «континент – океан» и в атмосфере реализуется специфическая структура циркуляции. Пессимистический вывод о повышенной экологической уязвимости Японских островов можно несколько сгладить замечанием о некотором положительном моменте, относящемся к мониторингу атмосферы.

С позиций мониторинга функционал (2) представляет собой результат наблюдений, а функция чувствительности дает информацию о степени информативности самих наблюдений и о степени наблюдаемости источников загрязнений для целей их идентификации по данным измерений [15]. Поэтому из анализа результатов следует вывод, что если в этой зоне разместить систему мониторинга, то она обеспечит слежение за специфическими выбросами от источников, расположенных на громадной территории, определяемой конфигурацией носителей соответствующих уровней значений функции чувствительности. И чем выше по вертикали будут располагаться приборы, тем больше будет область наблюдаемости.

Заключение

Таким образом, предлагаемая методика дает возможность не только выявлять климатически и экологически значимые области, но и планировать размещение систем мониторинга, наиболее эффективных с позиций информативности и наблюдаемости по отношению к источникам антропогенных воздействий.

Автор выражает благодарность Е.А. Цветовой за помощь в организации сценариев моделирования и проведение расчетов.

Работа выполняется при поддержке гранта «Ведущие научные школы» № 00-15-98543, Программы перспективных информационных технологий Минпромнауки России (проект 0201.06.269/349) и Интеграционных грантов СО РАН-2000 (№ 64 и № 56).

1. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 351 с.
2. Penenko V. Methodology of inverse modeling for the problems of climate changes and environmental protection // Advanced Mathematics: Computations and applications: Proc. of the International Conference AMCA-95. Novosibirsk: NCC Publisher, 1995. P. 358–367.
3. Penenko V. Some aspects of mathematical modeling using the models together with observational data // Bull. of the Novosibirsk Computing Center. Series: Num. Mod. In Atmosphere Ocean and Environment Studies. 4(1996). P. 31–52.
4. Penenko V. Mathematical models for monitoring and forecast of atmospheric aerosol spreading // Proc. SPIE. 1999. V. 3983. P. 544–552.
5. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 254 с.
6. Пененко В.В., Алоян А.Е. Математические модели взаимосвязей между термодинамическими и химическими процессами в атмосфере промышленных регионов // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1995. Т. 31. № 3. С. 372–384.
7. Пененко В.В., Цветова Е.А. Подготовка данных для экологических исследований с использованием Reanalysis // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 482–487.
8. Пененко В.В., Цветова Е.А. Анализ масштабов антропогенных воздействий в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 4. С. 392–396.
9. Пененко В.В., Цветова Е.А. Математические модели для исследования взаимодействия в системе «озеро Байкал –

- атмосфера региона» // Прикл. мех. и техн. физ. 1999. Т. 40. № 2. С. 137–147.
10. Пененко В.В., Цветова Е.А. Некоторые аспекты решения взаимосвязанных задач экологии и климата // Прикл. мех. и техн. физ. 2000. Т. 41. № 5. С. 161–170.
 11. Kalney E., Ranamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
 12. Пененко В.В., Цветова Е.А. Моделирование процессов переноса примесей в прямых и обратных задачах климатологического мониторинга // Оптика атмосф. и океана. 1990. Т. 12. № 5. С. 463–465.
 13. Schwartz L. Analyse Mathematique. Paris: Herman, 1967. P. 742.
 14. Пененко В.В., Цветова Е.А. Формирование сценариев атмосферной циркуляции для климато-экологических исследований // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 491–495.
 15. Пененко В.В., Цветова Е.А. Об оценке информативности наблюдательных экспериментов // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 649–655.

V.V. Penenko. Revealing the domains of increased ecological vulnerability: concepts and approaches to realization.

The domains of increased ecological vulnerability with respect to anthropogenic load are revealed with the help of mathematical modeling and analysis of the global climatic data. These domains are characterized by high sensitivity of atmospheric quality to the variations of the sources of pollution.

The result presented are obtained from solution of interconnected ecologic and climatic problems. The methodology is based on variational principles and combination of direct and inverse modeling procedures and sensitivity methods. The regional and hemispheric models of pollutant transport and transformation were used. The scenarios of atmospheric circulation were built with the help of hydrodynamical models of informative type in which the data from Reanalysis NCEP/NCAR were assimilated.