

**В.В. Пененко, Е.А. Цветова**

## **Об оценке информативности наблюдательных экспериментов**

*ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск*

Поступила в редакцию 9.02.2000 г.

Обсуждаются методические вопросы, возникающие при планировании и проведении специальных крупномасштабных наблюдательных экспериментов по исследованию процессов энергомассообмена в климатической системе. Исследования базируются на применении методов прямого и обратного моделирования в рамках сценарного подхода. Исходя из целей эксперимента, формулируется совокупность функционалов и по ним методами теории чувствительности моделей оценивается информативность наблюдательных экспериментов. В качестве примера приводятся расчеты по имитации наблюдательных экспериментов на трассе вдоль железнодорожной магистрали Москва – Владивосток.

### **Введение**

Основная цель настоящей работы заключается в создании методики и приобретении опыта решения задач по информационной поддержке идеи «направленного» мониторинга. Направленный мониторинг предпринимается обычно для разрешения заранее поставленных вопросов, таких как выявление источников загрязнения, обнаружение веществ, являющихся вторичными продуктами трансформации и предсказываемых моделями, которые не содержатся в первичном составе выбросов, обеспечение фактическими данными математических моделей и т.д. Подход, сочетающий математическое моделирование и направленный мониторинг, разрабатывался в интеграционном проекте ИГ СО РАН-97 №30 [1].

При проведении натурных наблюдений возникает множество различных вопросов, среди которых выделяется проблема информативности полученных в эксперименте данных. Исследования информативности базируются на применении методов прямого и обратного моделирования, решении специальных обратных задач в рамках сценарного подхода. Исходя из целей эксперимента, формулируется совокупность функционалов, описывающих результаты наблюдений за качеством атмосферы, и по их поведению в пространстве параметров модели оценивается информативность наблюдательных экспериментов. Для этих функционалов рассматриваются функции чувствительности, по ним ищутся области информативности для каждого наблюдения в отдельности и для всей совокупности наблюдений в целом и оценивается относительная опасность источников загрязнения для качества атмосферы зоны-детектора.

В алгоритмах расчета функций чувствительности участвуют решения соответствующих сопряженных задач. Различные аспекты применения сопряженных уравнений для анализа сложных систем описаны в монографии [2].

В данной статье используется вариационный принцип, развитый в [3–5] для целей численного моделирования и совместного использования моделей и результатов измерений. Он базируется на методах классической теории вариационного исчисления, модифицированных для работы в конечномерных пространствах дискретных аппроксимаций моделей. Его применение дает единую конструк-

тивную 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. Сопряженные задачи для моделей процессов возникают при этом 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.

### **Алгоритмы для оценки функционалов**

Итак, рассмотрим задачу об оценке функционалов, определенных на множестве значений функций состояния климатической системы, находящейся под влиянием естественных и антропогенных факторов.

С помощью функционалов, которые являются обобщенными характеристиками поведения системы, можно представить различные аспекты исследуемых и моделируемых процессов, а также наблюдений за этими процессами средствами мониторинга. Поэтому на практике могут возникать самые разные по информационному содержанию функционалы.

Для описания поведения климатической системы используем комплекс моделей гидротермодинамики, переноса и трансформации загрязняющих примесей, гидрологического цикла, которые обычно участвуют во взаимосвязанных задачах экологии и климата [6–7].

Чтобы не заниматься конструированием алгоритмов для каждого вида функционалов в отдельности, изложим универсальную схему алгоритмов для оценок функционалов общего вида и укажем способ включения любого конкретного функционала в эту схему. Сначала заметим, что функционалы, для которых выполняются построения, должны обладать следующими свойствами.

1. Пусть математические модели и функции состояния определяются в пространственно-временной области  $D$ , а их дискретные аналоги – в области  $D_i^h \in D$ . Тогда функционалы должны быть ограничены и дифференцируемы относительно функций состояния на  $D$ . В свою очередь, непрерывная зависимость функций состояния

от входных параметров модели является следствием корректности постановок соответствующих задач.

2. Функционалы должны быть представимы в виде интегралов в области  $D_t$  с мерами Радона или Дирака [8]. Эти меры являются элементами пространства, сопряженного по отношению к пространству функций состояния. Дискретные аналоги функционалов определяются в виде кубатурных сумм на  $D_t^h$  с той же дискретизацией функции состояния, что и в математических моделях.

Таким образом, функционалы могут быть представлены в виде

$$\Phi_k(\Phi) = \int F_k(\Phi) \chi_k(\mathbf{x}, t) dDdt, \quad k = \overline{1; K}, \quad K \geq 1. \quad (1)$$

Здесь  $F_k(\Phi)$  – подлежащие оценке характеристики функции состояния. Вид их определяется исследователем с учетом сформулированных выше свойств;  $\chi_k(\mathbf{x}, t)$  – весовые функции с носителями  $D_k^0 \subset D_t$ ;  $\chi_k(\mathbf{x}, t) dDdt$  – меры Радона в  $D_t$ , удовлетворяющие условиям нормировки  $\int_{D_t} \chi_k(\mathbf{x}, t) dDdt = 1$ . Если  $D_{ik}^0$  представляет собой сово-

купность точек (не менее одной), то  $\chi_k(\mathbf{x}, t) dDdt$  – меры Дирака в  $D_t$  [8]. Функционалы (1) всегда имеют вид скалярного произведения, поэтому структуры функций  $F_k(\Phi)$  и  $\chi_k(\mathbf{x}, t)$  должны быть взаимно согласованы, т.е. они могут быть либо обе скалярными, либо векторными.

Функционалы (1) можно трактовать как обобщенные характеристики поведения исследуемых процессов, получаемые с помощью систем мониторинга или математического моделирования. Уточним физический смысл весовых функций  $\chi_k(\mathbf{x}, t)$  в (1) с позиций мониторинга:

1) это могут быть функции распределения наблюдаемых приборов-детекторов, используемых для взвешенной оценки функций  $F_k(\Phi)$  в  $D_t$ ;

2) носитель весовой функции  $\chi_k(\mathbf{x}, t)$ , т.е. множество точек  $(\mathbf{x}, t)$ , где функция имеет ненулевые значения, описывает пространственно-временное размещение приборов, область  $D_{ik}^0$  можно рассматривать как зону-детектор для соответствующего функционала;

3) значения  $\chi_k(\mathbf{x}, t)$  определяют вес, с которым значение функции  $F_k(\Phi)$  в точке  $(\mathbf{x}, t)$  учитывается в суммарном выражении оцениваемой характеристики  $\Phi_k(\Phi)$ .

Наша задача состоит в том, чтобы оптимальным путем связать вариации функционалов (1) непосредственно с вариациями входных параметров и внешних источников в моделях. Оптимальность здесь понимается в том смысле, чтобы вариации оцениваемых характеристик не зависели от вариаций функций состояния внутри области  $D_t$ . Требуемые оценки получаются методами теории чувствительности из условий стационарности функционалов (1) к вариациям функций состояния при условиях, что последние удовлетворяют уравнениям моделей процессов или их дискретных аналогов. Другими словами, модели процессов выступают как ограничения на класс функций и как связи между функциями состояния, параметрами и источниками.

Для построения дискретных аналогов модели и алгоритмов моделирования удобнее всего работать с вариационными формулировками моделей в виде интегрального тождества [4, 7]:

$$I(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y}) = 0; \quad (2)$$

$$\Phi \in Q(D_t), \quad \Phi^* \in Q^*(D_t); \quad \mathbf{Y} \in R(D_t),$$

где  $\Phi$  – функции состояния;  $\mathbf{Y}$  – вектор параметров модели и внешних источников;  $R(D_t)$  – область их допустимых значений;  $\Phi^*$  – произвольная достаточно гладкая функция из пространства  $Q^*(D_t)$ , сопряженного по отношению к пространству функций состояния  $Q(D_t)$ . Заметим, что весовые функции в (1) также берутся из этого сопряженного пространства. Существенно, что функционал (2) линеен относительно вектора  $\Phi^*$ .

Если модель, содержащаяся в задаче (2), рассматривать как ограничения, то в соответствии с техникой вариационного исчисления вместо функционалов (1) можно ввести семейство расширенных функционалов, эквивалентных исходным на множестве функций состояния модели:

$$\tilde{\Phi}_k(\Phi) = \Phi_k(\Phi) + I(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y}). \quad (3)$$

В этом случае  $\Phi^*$  можно рассматривать как обобщенный множитель Лагранжа или как весовую функцию для учета уравнений модели.

Оптимальная схема оценок получается из условий независимости вариаций дискретных аналогов функционалов (1)–(3) от вариаций функций  $\Phi$  и  $\Phi^*$  на  $D_t^h$ . Эти условия приводят к системам уравнений

$$\frac{\partial}{\partial \Phi^*} I^h(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y}) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \Phi} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} [\Phi_k^h(\Phi + \xi \delta \Phi) + I^h(\Phi + \xi \delta \Phi, \Phi^*, \mathbf{Y})]_{\xi=0} \right\} = 0, \quad (5)$$

где индекс  $h$  отмечает дискретные аналоги;  $\delta \Phi$  – вариации функции состояния;  $\xi$  – вещественный параметр. Дискретизация функционала  $I(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y})$  осуществляется с использованием методов слабой аппроксимации, расщепления и декомпозиции [4, 6].

Уравнения (4) представляют собой дискретный аналог моделей процессов, а (5) – совокупность сопряженных задач для функционалов (1). В построенных таким образом сопряженных задачах функции

$$\eta_k \equiv \frac{\partial}{\partial \Phi} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} [F_k(\Phi + \xi \delta \Phi)]_{\xi=0} \right\} \chi_k(\mathbf{x}, t), \quad (6)$$

порождаемые функционалами (1), выступают в роли источников. В (5) они всегда имеют структуру вектор-столбца, которая выбирается с учетом согласования кубатурных формул для дискретизации слагаемых-функционалов в (3). Решаются эти задачи в обратном направлении времени при начальных условиях  $\Phi_k^*(\mathbf{x}, t) = 0$  при  $t \geq \bar{t}$ , где за  $\bar{t}$  принимается последнее значение момента времени  $t$ , при котором функция  $\eta_k$  отлична от нуля хотя бы в одной точке области  $D_t^h$ .

С использованием решений задач (4)–(6) оптимальный алгоритм оценок приводит к основным соотношениям теории чувствительности

$$\begin{aligned} \delta \Phi_k^h(\Phi) &\equiv (\text{grad}_{\mathbf{Y}} \Phi_k^h(\Phi), \delta \mathbf{Y}) = \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi} I^h(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y} + \xi \delta \mathbf{Y})_{\xi=0}, \quad k = \overline{1, K}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\delta\mathbf{Y}$  – вектор вариаций входных величин;  $\text{grad}_y \Phi_k(\boldsymbol{\varphi})$  – совокупность функций чувствительности оцениваемого функционала к этим вариациям.

Второе равенство в (7) представляет собой конструктивное преобразование структуры скалярного произведения в (1) из пространства функций состояния в пространство параметров модели. Конкретный вид функций чувствительности получается приравнением коэффициентов в правой и левой частях этого равенства при одноименных вариациях  $\delta\mathbf{Y}_i$ , ( $i = \overline{1; N}$ ) или дифференцированием последнего выражения в (7) по  $\delta\mathbf{Y}_i$  на  $R^h(D_i^h)$ .

Функции  $\boldsymbol{\varphi}$  и  $\boldsymbol{\varphi}^*$ , ( $k = \overline{1; N}$ ) ищутся при невозмущенных входных данных  $\mathbf{Y}$ , и оценки вариаций по формулам (7) получаются также в окрестности этих значений. Количественные значения вариаций (7) могут быть рассчитаны, если хотя бы одна из компонент  $\delta\mathbf{Y}_i$  отлична от нуля. Полученные с помощью алгоритма (4)–(7) соотношения для оценок вариаций имеют второй порядок точности относительно вариаций  $\delta\boldsymbol{\varphi}$ .

Отметим некоторые частные случаи. Если функционал и модель линейны, параметры модели не варьируются и требуется оценивать зависимость функционалов только от источников и начальных данных, то внутренняя структура алгоритмов упрощается. В этом случае в сопряженных задачах (5) и (6) исключаются операции линеаризации относительно  $\boldsymbol{\varphi}$  и не требуется решать основную задачу (4). В формуле (7) остаются только слагаемые, относящиеся к источникам и начальным данным. По этим формулам, в зависимости от способа задания входных данных об источниках неоднородностей, можно рассчитывать и значения самих функционалов и их вариации. Если кроме источников варьируются и другие параметры, то, даже для линейных моделей и функционалов, алгоритм оценок реализуется по общей схеме (4)–(7).

Приведем пример соотношения чувствительности (7) для модели гидротермодинамики атмосферы с учетом гидрологического цикла, объединенной с моделью переноса и трансформации примесей, принятой в качестве базовой для решения задач мониторинга и прогнозирования [7]:

$$\begin{aligned} \delta\Phi_k^h(\boldsymbol{\varphi}) = & \left\{ \int_{D_i} \{c_3 \delta Q_T T_k^* + c_4 \delta Q q_k^* + \sum_{\alpha=1}^n c_{\alpha+4} + \right. \\ & + (\delta Q_{C\alpha} - \delta(B(C))_{\alpha} C_{\alpha}^*) dD dt + \int_D \sum_{i=1}^{4+n} c_i \delta\psi_i \varphi_i^* \Big|_{t=0} m dD + \\ & \left. + \mathbf{R}_1(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\varphi}^*, \delta\mathbf{Y}) + \mathbf{R}_2(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\varphi}^*, \delta\mathbf{Y}) + \mathbf{R}_3(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\varphi}^*, \delta\mathbf{Y}) \right\}; \quad (8) \end{aligned}$$

где  $k = \overline{1; K}$ , а  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3$  имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_1(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\varphi}^*, \delta\mathbf{Y}) \equiv & \int \left\{ \delta U_n \sum_{i=1}^{4+n} c_i \psi_i \varphi_{ik}^* \frac{m^2}{\pi} + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^{4+n} c_i U_n \delta\psi_i \varphi_{ik}^* \frac{m^2}{\pi} - \frac{\delta\pi}{\pi^2} \sum_{i=1}^{4+n} m^2 c_i U_n \psi_i \varphi_{ik}^* \right\} d\Omega dt, \\ \mathbf{R}_2(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\varphi}^*, \delta\mathbf{Y}) \equiv & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} + \sum_{i=1}^{4+n} c_i \left\{ \int_{D_i} \left[ \delta\mu_i \text{grad}_s \psi_i \text{grad}_s \varphi_{ik}^* + \frac{\delta v_i}{m} \frac{\partial \psi_i}{\partial \sigma} \frac{\partial \varphi_{ik}^*}{\partial \sigma} \right] m^2 dD dt + \right. \\ \left. + \int_{\Omega_i} \delta r_i \varphi_{ik}^* m d\Omega dt + \int_{S_i} \delta \tau_i \varphi_{ik}^* m dS dt \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_3(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\varphi}^*, \delta\mathbf{Y}) \equiv & \int_{\Omega} \{ G_k^* \delta U_n + U_{nk}^* \delta G + (U_{nk}^* - U_n T_k^*) \delta \pi - \\ & - \pi T_k^* \delta U_n \} m d\Omega dt - \int_S T_k^* \delta(G_s \pi) + \pi_k^* \delta \pi \Big|_{t=0} dS. \end{aligned}$$

Здесь используются обозначения из [7]:  $\boldsymbol{\varphi} = \{\varphi_i, (i = \overline{1; 4+n})\} \equiv \{u, v, T, q, C_{\alpha} (\alpha = \overline{1; n}), \dot{\sigma}, G, \pi\}$  – функция состояния базовой модели;  $\boldsymbol{\psi} = (\pi/m)\boldsymbol{\varphi}$ , звездочкой отмечены соответствующие им компоненты сопряженных функций;  $U_n$  – нормальная составляющая вектора скорости  $\mathbf{U} = (\pi/m)(u, v, \dot{\sigma})$  к границе  $\Omega_i$  области  $D_i$ ;  $S_i$  – проекция области  $D_i$  на поверхность Земли;  $u, v, \dot{\sigma}$  – составляющие вектора скорости в направлении координат  $x, y, \sigma$  соответственно;  $T$  – температура;  $q$  – удельная влажность;  $C_{\alpha}$  – концентрации загрязняющих примесей;  $n$  – число различных веществ;  $G$  – геопотенциал;  $\pi$  – функция от давления;  $m$  – масштабный множитель системы координат;  $dD, d\Omega, dS$  – элементы объема и площадей;  $c_i$  ( $i = \overline{1; 4+n}$ ) – весовые коэффициенты для выравнивания физических размерностей слагаемых в интегральном тождестве модели (2);  $\mu_i, v_i$  – коэффициенты горизонтального и вертикального обмена для субстанции с номером  $i$ , а  $r_i, \tau_i$  – значения турбулентных потоков на границах  $\Omega_i$  и  $S_i$ . Символ  $\delta$  обозначает вариации входных, по отношению к модели, величин: компонентов вектора состояния  $\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\psi}$ , ( $\delta\psi_i = \pi\delta\varphi_i + \varphi_i\delta\pi/m$ ,  $\delta\varphi_i = (m\delta\psi_i - \varphi_i\delta\pi)/\pi$ , вектора параметров  $\mathbf{Y}$ , источников тепла  $Q_T$ , влаги  $Q_q$  и примесей  $Q_C$ . Член  $\delta(B(C))$  обозначает вариацию оператора трансформации примесей за счет вариаций констант скоростей реакций, учитываемых в структуре этого оператора. Слагаемые, содержащие вариации притоков тепла  $\delta Q_T$ , зависят от вариаций концентраций оптически активных газов. Для их расчета рассматривается комплексная базовая модель гидротермодинамики с радиационным блоком совместно с моделью распространения примесей.

Прокомментируем смысл этого соотношения. Самое главное, оно показывает, что все элементы моделей взаимосвязаны и для оценок функционалов необходимо учитывать возможные возмущения всех входных параметров и внешних источников. Решения сопряженных задач берут на себя все внутренние связи моделей, в результате чего в (8) остаются только слагаемые с вариациями входных величин. Интегралы по границам области  $D_i$  и  $D$  при  $t=0$  учитывают влияние граничных условий и начальных данных. Для моделей на сфере часть таких интегралов исключается из-за условий периодичности.

Особо следует отметить интегралы трех типов, содержащие источники тепла, влаги и примесей. Множители, стоящие при вариациях источников, есть функции чувствительности. Они являются мерой непосредственного влияния вариаций источников на значение вариаций функциона-

ла (в линейных задачах – влияния самих источников на значение функционала). Но эти слагаемые не описывают полностью влияние источников на функционал. Имеется еще косвенный вклад, который описывается совокупным действием других слагаемых с функциями чувствительности, в расчетные формулы которых входят компоненты функции состояния. Это, например, слагаемые, содержащие вариации коэффициентов турбулентности, функции приземного давления, геопотенциала, оператора трансформации примесей и др.

Функции чувствительности источников (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.) определяются в области  $D_t = D \times [0, \bar{t}]$ . Они зависят от пространственно-временных координат  $(x, t) \in D_t$  и от пяти обобщенных параметров:  $Y_1$  – структуры оцениваемого функционала качества атмосферы;  $Y_2$  – конфигурации и размещения зоны детектора в  $D$ ;  $Y_3$  – интервала времени проведения «наблюдений» для оценки;  $Y_4$  – интервала времени действия источника;  $Y_5$  – характеристики режима действия источника или параметра.

Первые три параметра определяются видом функционала и носителем весовой функции в нем, а четвертый и пятый – параметрами модели. Последние два определяют пространственно-временную структуру функции чувствительности. Аналогично можно описать и другие функции чувствительности.

Информационный смысл функции опасности для функционалов, определяющих качество атмосферы в зоне-детекторе, можно описать следующим образом. Значение этой функции в точке  $(x, t) \in D_t$  есть величина относительного вклада выброса загрязнений от источника, расположенного в точке  $x$  в интервале времени его действия, в представленное значением функционала суммарное количество загрязнений, поступающих в атмосферу зоны «детектора» за интервал времени наблюдений.

Понятие информативности системы мониторинга для оценки функционалов (1) тесно связано с понятием наблюдаемости в теории оптимального управления. Общее условие наблюдаемости для моделей рассматриваемого класса заключается в том, чтобы носители функций чувствительности накрывали области действия оцениваемых параметров или источников, для которых определяются эти функции чувствительности. Исходя из этого, уровень значений функций чувствительности, по существу, определяет возможности оценки искомых характеристик по данным наблюдений с помощью решения соответствующих обратных задач. Чем выше уровень значений, тем сильнее связь оцениваемых параметров с наблюдениями, т.е. с функционалами, и, следовательно, будет более определенной обратная задача. Отсюда следует, что можно достоверно найти значения только тех параметров, которые попадают в область чувствительности-наблюдаемости. Учет функций чувствительности и областей информативности при планировании наблюдательных экспериментов может существенно повысить эффективность исследований. Заметим, что то же самое справедливо и при решении задачи использования данных наблюдений с целью восстановления пространственно-временной структуры полей при недостаточной освещенности данными.

Имеющийся у нас опыт показывает, что многофакторные оценки информативности с помощью комплекса

моделей более содержательны, чем однофакторные по одной модели. Это отчетливо проявилось, в частности, при оценках уровней антропогенных воздействий на регион оз. Байкал [9]. Для решения этой задачи использовался комплекс, включающий региональную модель гидротермодинамики, региональную и полусферную модели переноса примесей в атмосфере. Интересно отметить, что рассчитанные по функциям чувствительности зоны повышенной опасности источников загрязнений для качества атмосферы над озером совпали с зонами влияния байкальских мезоклиматов. То же самое можно сказать и об оценках информативности данных наблюдений. Если систему наблюдений выбирать с учетом значимости функций чувствительности, то получаются приемлемые для практики результаты восстановления полей при усвоении даже небольшого количества данных [10], так как в этом случае модели работают как интерполянты с достаточно широкой областью влияния каждого наблюдения.

Сделаем несколько замечаний о практической реализации алгоритмов с позиции вычислительных технологий. Сложность самих моделей и алгоритмов, а также большие объемы информации, которые необходимо накапливать и обрабатывать, заставляет задумываться об эффективных способах получения результатов. С этой целью естественно использовать параллельные вычисления. Анализ проблемы в целом показывает, что можно организовать распараллеливание по нескольким системным уровням процесса моделирования, а именно:

1. Все базовые модели комплекса могут работать параллельно до предписанных моментов встречи и обмена информацией. Их численные схемы строятся с помощью тождества (2) на принципах расщепления и декомпозиции. Следовательно, все множество элементарных схем и этапов расщепления на одном шаге по времени может реализовываться параллельно.

2. Все сопряженные задачи для совокупности функционалов (1) могут решаться параллельно. Их расчетные схемы идентичны и отличаются только алгоритмами расчета функций (6). В свою очередь, структура каждой сопряженной задачи порождается сумматорным аналогом тождества (2) и распараллеливается по аналогии с алгоритмами реализации базовых моделей (4).

3. Алгоритмы расчета функций чувствительности по формулам (7), (8) для всех функционалов и для всех параметров моделей могут работать независимо и параллельно.

4. Расчеты сценариев при различных вариантах входных данных и гидрометеорологических ситуаций могут выполняться параллельно с иерархической структурой распараллеливания на системных уровнях 1–3.

В настоящее время разрабатываются параллельные варианты базовых моделей различных системных уровней с учетом специфических особенностей доступной нам вычислительной техники суперкомпьютерного центра ИВМиМГ СО РАН.

## Численные эксперименты

Для иллюстрации основных положений статьи были выбраны результаты сценарных расчетов по модели переноса примесей для функционалов, которые имеют двойственную интерпретацию. С природоохранных позиций они дают взвешенную интегральную величину характеристики качества атмосферы  $F_k(\varphi)$  в зонах-детекторах, определяемых носителем весовой функции  $\chi_k(x, t)$ . С позиций мониторинга те же

самые функционалы можно трактовать как математическое описание результатов наблюдений характеристики  $F_k(\varphi)$ , полученных с помощью приборов, расположенных в зоне-детекторе и производящих наблюдения по заданному режиму. Результаты наблюдений суммируются с весом, задаваемым значениями функции  $\chi_k(x, t) \geq 0$ . В этом смысле численные эксперименты имитируют действия наблюдателей.

Для простоты во всех сценариях приняли  $F_k(\varphi) \equiv \varphi$ , чтобы не решать прямую задачу и оценивать информативность только по отношению к источникам примесей. Отличия в сценариях состояли в задании различных зон-«детекторов» и весовых функций в функционалах. Рассматривались сценарии для невесомых пассивных примесей.

В первом примере приводятся расчеты по имитации и интерпретации наблюдательного эксперимента, выполненного сотрудниками Института физики атмосферы РАН. Суть его состояла в следующем. По железнодорожной магистрали Москва–Владивосток по определенному расписанию двигался поезд, в составе которого была вагон-лаборатория, выполняющая измерения атмосферных характеристик вдоль траектории поезда. Перед нами стояла задача оценить информативность этих наблюдений. Иначе говоря, требовалось понять, где могут находиться источники загрязнений, вклад которых мог быть обнаружен в результатах наблюдений.

Для математической формулировки требовалось задать структуру функционала наблюдений и выполнить расчеты по сопряженной задаче для этого функционала. Использовалась полусферная модель переноса примесей в гибридной « $r$ -сигма» системе координат из комплекса моделей, описанного в [7, 11]. Натурный эксперимент проводился 12–20 августа 1996 г. Гидрометеорологические данные для северного полушария за этот период были взяты из базы данных Reanalysis NCEP/NCAR [12]. Пространственно-временная структура гидрометеорологических полей с дискретностью по времени 30 мин на сетке в гибридной системе координат была восстановлена с помощью процедур, описанных в [13]. Весовая функция в функционале полагалась равной постоянной величине, отличной от нуля, на фазовой траектории движения поезда. Координаты ее пространственно-временного носителя задавались в соответствии с расписанием движения. Функционал, таким образом, представлял суммарное количество примесей, измеренное за все время движения по траектории.

Расчет проводился в режиме обратного моделирования, т.е. источники неоднородностей (7) в сопряженной задаче, порождаемые функционалом наблюдений, перемещались в обратном направлении времени (по отношению к режиму прямого движения поезда) от Владивостока до Москвы. Интервал времени, для которого решалась задача, был несколько шире (с 20 августа по 5 августа в обратном времени), чем время проведения наблюдений. Это нужно было для того, чтобы выяснить, насколько долго функции чувствительности будут оставаться значимыми вне пределов интервала наблюдений. Иными словами, мы хотели узнать, какое влияние на функционал могут оказать события, происшедшие до начала эксперимента.

Для анализа изменений функций чувствительности в пространстве и времени результаты расчетов были визуализированы в виде компьютерных фильмов. Они наглядно показали существенную изменчивость функций чувствительности, обусловленную изменчивостью гидродинамических характеристик атмосферы. По результатам расчетов оказалось, что информативность функции чувствительности сохраняется от 2 до 4 сут вне пределов интервала наблюдений. Из это-

го следует, что события, происшедшие за 1–100 ч до наблюдения в областях со значимыми уровнями функции чувствительности, могут внести свой вклад в значения наблюдаемых величин. Расчет дает относительные уровни значимости каждой области независимо от мощности расположенных в ней источников выбросов. Для оценок абсолютного вклада каждого источника нужно знать объем его выбросов.

На рис. 1 представлены интегральные по времени значения функции информативности по отношению к источникам примесей, которые могут располагаться на двух уровнях: на поверхности Земли и в стратосфере на высоте уровня 20 мбар. Трехмерное поле, двухмерные сечения которого представлены на рис. 1, было нормировано на максимальное значение. Вблизи поверхности Земли достаточно высоким уровнем значимости обладают области, находящиеся непосредственно около трассы и на расстояниях 100–200 км от нее.

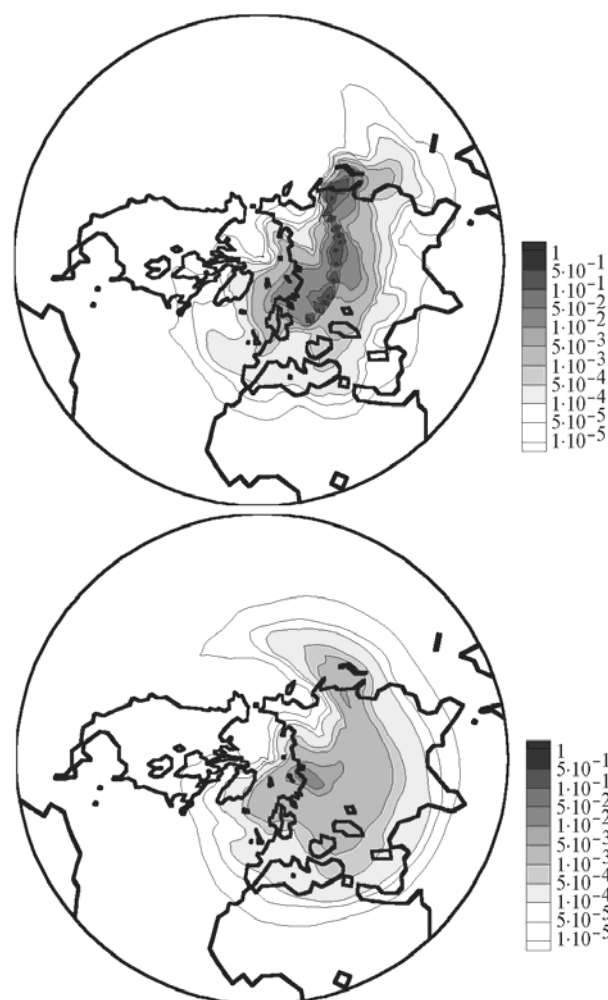


Рис. 1. Функция информативности для передвижной системы наблюдений по отношению к источникам на поверхности Земли (верхний рисунок), по отношению к источникам на уровне 20 мбар – нижний рисунок

Второй пример отличался от первого лишь способом задания режима работы наблюдателя. Предполагалось, что на той же трассе в тот же период времени действует стационарная сеть, т.е. измерения по всей трассе производятся весь период наблюдений и их результаты суммируются. Компьютерные фильмы показали, что изменчивость здесь

проявляется несколько иначе, чем в предыдущем случае. На рис. 2 представлены те же характеристики, что и на рис. 1. Как и в первом примере, поле нормировано на свое максимальное значение.

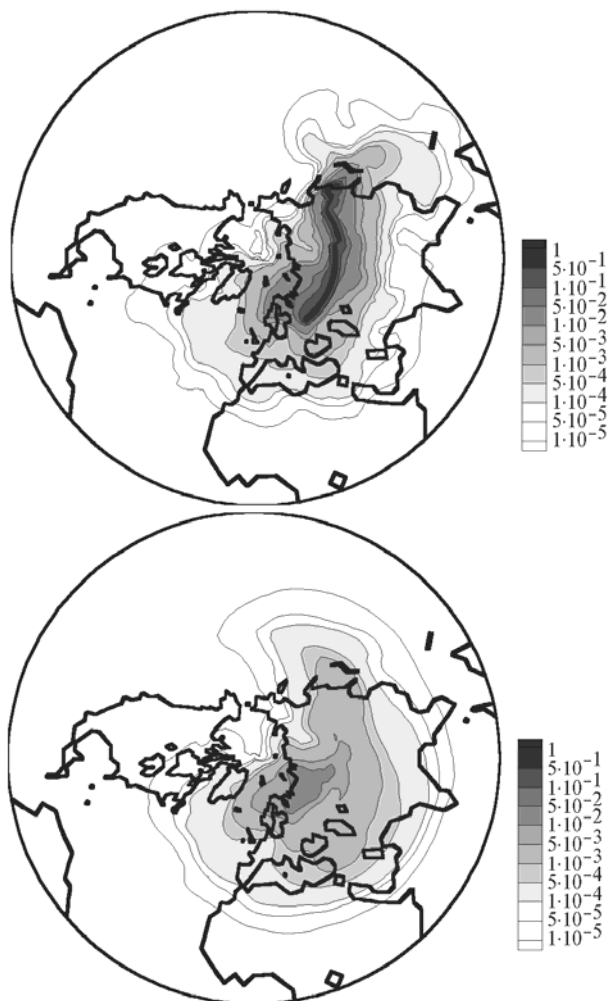


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для стационарной системы наблюдений

### Выводы

Сопоставление результатов экспериментов для подвижной и неподвижной систем наблюдений для одних и тех же условий показывает, что в динамике функции чувствительности по-разному откликаются на изменчивость атмосферной циркуляции. Для подвижной системы в функциях чувствительности проявляется эффект типа бегущей волны в пространстве в соответствии с прохождением носителя весовой функции по фазовой траектории.

Информативность зависит от продолжительности измерений. Стационарная система из-за большей длительности индивидуальных наблюдений и их синхронности по времени получается в целом более информативной. В обоих

случаях преобладает влияние источников ближней зоны, хотя остаются значимыми влияния источников, удаленных от трассы до расстояний порядка 500 км. Это значит, что по измерениям можно с определенной степенью достоверности идентифицировать выбросы специфических веществ (т.е. тех, которые не содержатся в выбросах источников в ближней зоне) от удаленных источников с временным сдвигом от момента выбросов до измерений примерно 5–7 сут для неподвижной системы и 2–4 сут для подвижной системы. Эти обстоятельства следует учитывать при планировании фазовых траекторий наблюдений. Следовательно, если нет возможности организовать стационарную систему мониторинга, то передвижные лаборатории, оснащенные многофункциональным комплексом приборов, позволяющим измерять широкий спектр веществ, могут обеспечить идентификацию выбросов от источников, попадающих в области чувствительности-наблюдаемости по фазовой траектории движения измерительной лаборатории. Это очень важно при решении проблемы экологической безопасности территорий, особенно когда там отсутствуют стационарные системы мониторинга.

Математические модели являются необходимым компонентом системы мониторинга, поскольку с их помощью можно повысить информативность наблюдений, объединить разнородную и несинхронную информацию и получить целостную картину развития ситуации.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (гранты № 98-05-65318, 99-07-90422), ИГ СО РАН-97 № 30, программы «Сибирь» и Программы перспективных информационных технологий Миннауки России (грант № 0201.06.269/349).

1. Пененко В.В., Кузин В.И., Панченко М.В. // Интеграционные программы фундаментальных исследований. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 368–379.
2. Марчук Г.И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М.: Наука, 1992. 335 с.
3. Пененко В.В. Вычислительные аспекты моделирования динамики атмосферных процессов и оценки влияния различных факторов на динамику атмосферы // Некоторые проблемы вычислительной и прикладной математики. Новосибирск: Наука, 1975. С. 61–77.
4. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 351 с.
5. Penenko V.V. Some aspects of mathematical modeling using the models together with observational data // Bul. NCC Series: Atmosph., Ocean, an Env. Studies. 1996 (4). P. 32–51.
6. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 255 с.
7. Пененко В.В., Цветова Е.А. // ПМТФ. 1999. Т. 40. № 2. С. 137–147.
8. Шварц Л. Анализ. Т. 1. М.: Мир, 1972. 824 с.
9. Пененко В.В., Алоян А.Е., Бажин Н.М. и др. // Метеорология и гидрология. 1989. № 7. С. 76–84.
10. Пененко В.В., Образцов Н.Н. // Метеорология и гидрология. 1976. № 11. С. 3–16.
11. Пененко В.В., Цветова Е.А. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 482–487.
12. Kalney E., Ranamitsu M., Kistler R., et al. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
13. Пененко В.В., Цветова Е.А. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 463–465.

V.V.Penenko, E.A.Tsvetova. On the informative quality of observational experiments.

Methodological aspects are discussed that arise when the specific large-scale observational experiments studying the energy and mass exchange in the climatic system are planned and fulfilled. The research is based on application of the direct and inverse modeling and on the solution to the special inverse problems in the framework of scenario approach. Following the goals of the experiment, a set of functionals is formulated and, using them, the informative quality of the observational experiments is estimated by means of the model sensitivity methods. As an example, the results imitating the rail-way Moscow – Vladivostok experiments are considered.