

Информационно-вычислительная технология для сценарных оценок динамики и качества атмосферы*

Э. А. Пьянова¹, Л. М. Фалейчик²

¹*Институт вычислительной математики*

и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

²*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия*

e-mail: pianova@ngs.ru, lfaleychik@rambler.ru

Представлено описание вычислительных технологий, развиваемых в ИВМиМГ СО РАН и ИПРЭК СО РАН для решения природоохранных задач.

Ключевые слова: численное моделирование, ГИС-технологии, динамика атмосферы, перенос примеси, монотонные схемы.

Введение

При хозяйственной деятельности человека с интенсивным техногенным вмешательством в природную среду возникает целый ряд природоохранных задач. Один из важных вопросов, который необходимо изучить перед началом промышленного освоения, — влияние проектируемых народохозяйственных объектов на качество и режим циркуляции атмосферы.

Оценить воздействие на атмосферу формирующихся при разработке полезных ископаемых глубоких карьеров и гор отвалов, выбросов промышленных предприятий, проектируемых ГЭС и водохранилищ, АЭС и ТЭЦ с не замерзающими зимой водоемами-охладителями можно с помощью математического моделирования на основе сценарного подхода. Этот способ предполагает проведение серии численных экспериментов с моделированием набора сценариев, описывающих микроклиматические режимы, характерные для исследуемых территорий.

В работе представлены математическая модель для описания динамики атмосферы над неоднородной орографией и алгоритм получения на ее основе численных оценок вероятного влияния проектируемых антропогенных объектов на качество и режимы циркуляции воздуха. Предлагаемый информационно-вычислительный подход к оценке динамики и качества атмосферы в областях со сложным рельефом включает построение алгоритмов реализации и комплекса программ на базе вариационного принципа с использованием дискретно-аналитических схем для конвективно-диффузионных операторов, обладающих свойствами монотонности, транспортности и консервативности. Новым здесь является также применение геоинформационных технологий в составе разработанного комплекса моделей и программ. Это существенно упростило процессы по-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-01-00187 и 10-06-00060а), Программ фундаментальных исследований № 4 Президиума РАН и № 3 Отделения математических наук РАН.

лучения входной информации о подстилающей поверхности исследуемых территорий, а также расширило возможности анализа результатов и подготовки иллюстративного материала.

1. Модель динамики атмосферы и переноса примеси

Для моделирования микроклимата использовалась мезомасштабная негидростатическая модель динамики атмосферы [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div} \rho u \mathbf{u} &= -\frac{\partial p'}{\partial x} + l \rho v + \Delta_u u, & \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div} \rho v \mathbf{u} &= -\frac{\partial p'}{\partial y} - l \rho u + \Delta_v v, \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \operatorname{div} \rho w \mathbf{u} &= -\frac{\partial p'}{\partial z} + \lambda \rho \vartheta' + \Delta_w w, & \frac{\partial \rho \vartheta'}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vartheta' \mathbf{u} &= -S \rho w + \rho \frac{L_w}{c_p} \Phi + \Delta_\vartheta \vartheta', \\ \frac{\partial \rho q'}{\partial t} + \operatorname{div} \rho q' \mathbf{u} &= -\rho w \frac{\partial Q}{\partial z} - \rho \Phi + \Delta_q q', & \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь t — время; x, y, z — декартовы координаты, $\mathbf{u} = (u, v, w)$, u, v, w — компоненты вектора скорости ветра в направлениях x, y, z соответственно; ϑ', q', p' — отклонения потенциальной температуры, массовой доли водяного пара и атмосферного давления от их фоновых значений; $\rho(z)$ — заданная функция плотности воздуха; Q — фоновое значение массовой доли водяного пара; L_w — скрытая теплота конденсации; Φ — скорость образования жидкой фазы; c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; l — параметр Кориолиса; S — параметр стратификации; λ — параметр плавучести. Фоновые поля, описывающие крупномасштабные атмосферные движения, предполагаются известными.

В начальный момент времени значения полей метеоэлементов приняты равными своим фоновым значениям, т. е. отклонения равны нулю. На боковых границах ставились однородные условия Неймана. На верхней границе задавались условия выхода метеоэлементов на их фоновые значения. Влияние орографических и термических неоднородностей подстилающей поверхности учитывалось в краевых условиях третьего рода на нижнем расчетном уровне модели [2], который совпадает с верхней границей приземного слоя.

В модели также рассчитывается температура подстилающей поверхности из уравнения баланса тепла на границе раздела атмосфера—почва. При этом учитываются суточный ход и неравномерное поступление прямой солнечной радиации на склоны различных экспозиции и уклона. Все расчеты проводились в предположении, что характеристики подстилающей поверхности являются кусочно-постоянными функциями в ячейках расчетной сетки, построенной на исследуемой области для численной реализации модели. Температура поверхности в ячейках, покрытых водой, в течение всего модельного времени (порядка двух суток) полагалась постоянной и задавалась в соответствии со средними значениями для рассматриваемых сезонов (использовались данные из справочной литературы). Наличие снежного покрова на исследуемых территориях учитывалось при задании альбедо подстилающей поверхности. Параметризация потоков тепла, влаги и импульса в приземном слое производится отдельно для каждой ячейки расчетной области с учетом характеристик поверхности и стратификации над ней.

Для моделирования пространственно-временной изменчивости пассивной примеси использовалось уравнение переноса с турбулентной диффузией

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \operatorname{grad} c = \Delta_c c + f(\mathbf{x}, t) \quad (2)$$

с начальными и граничными условиями

$$c(\mathbf{x}, t) = c^0(\mathbf{x}), \quad t = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad x = 0, X, \quad \frac{\partial c}{\partial y} = 0, \quad y = 0, Y, \\ \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad z = H, \quad \nu_c \frac{\partial c}{\partial z} = (\beta_c - w_c)c + f_0(x, y, t), \quad z = \delta(x, y),$$

где c — концентрация примеси; c^0 — поле концентрации примеси в начальный момент времени; $\mathbf{x} = (x, y, z)$; w_c — скорость оседания примеси; β_c — величина, характеризующая взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью; f, f_0 — функции источников.

Оператор Δ_α ($\alpha = u, v, w, \vartheta, q, c$) имеет вид $\Delta_\alpha = \frac{\partial}{\partial x} \mu_\alpha \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_\alpha \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \nu_\alpha \frac{\partial}{\partial z}$, где μ_α, ν_α — коэффициенты турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

Система уравнений (1)–(2) с начальными и граничными условиями интегрировалась в области $D_t = D \times [0, T]$, где $D = \{0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, \delta(x, y) + h \leq z \leq H\}$ — область изменения пространственных переменных, $\delta(x, y)$ — функция рельефа, h — высота приземного слоя, $0 \leq t \leq T$ — интервал времени.

2. Численная реализация модели

В данном разделе, следуя идеям и методике работ [3–5], приводится краткое описание методологии реализации модели гидротермодинамики атмосферы и переноса примеси над сложным рельефом. Численная реализация дифференциальных уравнений (1)–(2) с начальными и граничными условиями осуществлялась таким образом, чтобы разностные уравнения удовлетворяли балансным соотношениям, аналогичным тем, которые имеют место для исходной задачи в дифференциальной постановке. В качестве критерия для получения подходящих схем аппроксимации были выбраны соотношения баланса энергии и массы. Построение энергетически сбалансированных конечно-разностных уравнений для задачи (1)–(2) проводилось на базе интегрального тождества [3]. Для этого системе уравнений гидротермодинамики атмосферы и переноса примеси сопоставлялся вариационный функционал (интегральное тождество) специальной структуры, который получается в результате домножения уравнений системы на весовые функции $u^*, v^*, w^*, \vartheta^*, q^*, p^*, c^*$ и последующего интегрирования по частям по всей области D_t с учетом начальных и краевых условий.

Затем для полученного интегрального тождества $I(\varphi, \varphi^*) = 0$, где $\varphi = (u, v, w, \vartheta', q', p', c)$, $\varphi^* = (u^*, v^*, w^*, \vartheta^*, q^*, p^*, c^*)$, строились дискретные аппроксимации, и из условия стационарности сумматорного функционала $I^\tau(\varphi^\tau, \varphi^{*\tau}) = 0$ относительно произвольных и независимых вариаций сеточных функций $\varphi^{*\tau}$ получалась система конечно-разностных уравнений $\partial I^\tau(\varphi^\tau, \varphi^{*\tau}) / \partial \varphi^{*\tau} = 0$ (индекс τ означает дискретизацию по пространству и времени).

При специальном выборе аппроксимаций вариационного функционала по времени [3] были получены схемы расщепления. Совместное использование интегрального

тождества и метода расщепления позволило упростить реализацию модели за счет сведения ее к последовательности более простых задач и обеспечить взаимное согласование всех этапов, на которые разбивалась исходная задача гидротермодинамики атмосферы и переноса примеси. Для аппроксимации подынтегральных выражений по времени использовались неявные схемы.

В соответствии с принципами расщепления по физическим процессам [4] решение системы уравнений (1)–(2) с начальными и краевыми условиями было разбито на решения трех задач: конвекции-диффузии, согласования метеополей и учета фазовых переходов влаги.

Поскольку концентрация примесей по физическому смыслу не может быть отрицательной, большое значение в реализации численных моделей, основанных на уравнении переноса с турбулентной диффузией, имеют конечно-разностные схемы, обладающие свойствами монотонности и транспортности. Построение разностных схем для конвективно-диффузионных операторов первого этапа расщепления с указанными свойствами осуществлялось по методу, предложенному В.В. Пененко в [5]. При этом уравнения дополнительно расщеплялись по координатным направлениям, что позволило в дальнейшем решить одномерные сеточные уравнения экономичным методом прогонки.

Таким образом, для конвективно-диффузионных уравнений по каждому пространственному направлению были получены разностные схемы следующего вида:

$$\begin{aligned}
 (R_{\gamma+\frac{1}{2}} + R_{\gamma-\frac{1}{2}}) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)_{\gamma} - (u_s A_s B_s)_{\gamma+\frac{1}{2}} (\varphi_{\gamma+1} - \varphi_{\gamma}) + (u_s A_s)_{\gamma-\frac{1}{2}} (\varphi_{\gamma} - \varphi_{\gamma-1}) &= 0, \\
 (u_s A_s B_s) &\geq 0, \quad (u_s A_s) \geq 0, \quad R \geq 0, \quad u_s = u, v, w, \\
 (u_s A_s B_s)_{\gamma+\frac{1}{2}} &= -(\mu_s [\eta(1 - cth \eta)] / \Delta s)_{\gamma+\frac{1}{2}}, \quad (u_s A_s)_{\gamma-\frac{1}{2}} = (\mu_s [\eta(1 + cth \eta)] \Delta s)_{\gamma-\frac{1}{2}}, \\
 R_{\gamma\pm\frac{1}{2}} &= (\Delta s [1 \mp (\eta cth \eta - 1) / \eta] / 2)_{\gamma\pm\frac{1}{2}}, \quad \eta_{\gamma\pm\frac{1}{2}} = (u_s \Delta s / (2\mu_s))_{\gamma\pm\frac{1}{2}}, \\
 \Delta s_{\gamma} &= (s_{\gamma+1} - s_{\gamma-1}) / 2, \quad s = x, y, z, \quad \gamma = i, m, k.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Положительность всех коэффициентов и диагональное преобладание обеспечивают монотонность и устойчивость разностных схем (3). Полученные численные схемы также являются балансными и транспортными.

На этапе согласования полей метеоэлементов компоненты вектора скорости ветра выражались через отклонения давления и функции с предыдущего шага расщепления. После подстановки этих выражений в разностное уравнение неразрывности получался дискретный аналог уравнения Пуассона для нахождения отклонений давления, который реализовывался итерационным методом сопряженных градиентов. Через найденные значения отклонений давления вычислялись компоненты скорости ветра, а затем и остальные искомые метеовеличины.

На третьем этапе расщепления в каждом узле расчетной сетки производился учет фазовых переходов влаги.

Построенные разностные схемы для уравнений динамики атмосферы и переноса примеси (1)–(2) имеют первый порядок аппроксимации по времени и второй по пространственным переменным.

Учет орографии в задаче осуществлялся с использованием идей метода фиктивных областей [1, 6, 7].

3. Подготовка данных о подстилающей поверхности

В численной модели рельеф местности и другие характеристики подстилающей поверхности исследуемой области задаются с помощью числовых значений в узлах регулярной прямоугольной расчетной сетки. В настоящее время информацию о высоте, крутизне и ориентации склонов в каждой точке модельной территории можно получить из разных источников. Возможности существующих ГИС-технологий позволяют использовать для этого и различные цифровые модели рельефа (ЦМР).

В качестве источника информации о рельефе были использованы данные SRTM (<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov>), имеющие удовлетворительное для применяемой численной модели гидродинамики атмосферы разрешение (размер пиксела 30×30 м, погрешность измерения высоты не более 20 м).

Для автоматизации процесса извлечения из ЦМР информации о рельефе создан программный модуль, реализованный в ArcGIS 9¹ (Esri, Inc., USA) в виде расширения [8, 9]. С помощью инструментов этого модуля строится регулярная расчетная сетка, для каждого узла которой из ЦМР извлекается и присваивается значение высоты соответствующей точки местности. Построенная расчетная сетка имеет географическую привязку, что дает возможность в дальнейшем результаты моделирования отобразить на топографическую основу и проанализировать в среде ГИС [8, 9]. Кроме того, из дополнительных тематических слоев, описывающих объекты гидрографии, транспортной сети, а также населенные пункты, технические сооружения, охраняемые территории и т. д., с использованием функциональности ГИС выделяются соответствующие им узлы сетки. Подготовленная таким образом информация о подстилающей поверхности экспортируется в текстовые файлы, применяемые затем в численной модели.

Таким образом, разработанный программный модуль позволяет извлекать из растровых слоев информацию о рельефе и преобразовывать ее в удобный для использования в численной модели вид и, тем самым, облегчает решение проблемы получения и подготовки информации о подстилающей поверхности при математическом моделировании природных процессов.

4. Организация численных экспериментов

Оценка воздействия, оказываемого промышленными объектами на атмосферу, выполнялась на основе метода прямого моделирования путем проведения двух серий сценарных расчетов. Первая серия описывает микроклимат исследуемой территории до антропогенного вмешательства в природную среду, вторая — отражает ситуацию после вмешательства. Различия в распределении полей метеоэлементов в соответствующих модельных сценариях каждой серии расчетов позволяют оценить зону и степень возможного влияния проектируемых объектов.

Режимы локальных циркуляций атмосферы, характерные для каждой исследуемой области, были получены с помощью мезомасштабной модели динамики атмосферы (1). Рассчитывался суточный ход в распределении полей основных метеоэлементов для различных сезонов года, т. е. сначала на входе в модель задавались распределения фоновых полей метеоэлементов, типичные для соответствующего сезона и рассматриваемой территории, затем на фоне этих климатических данных моделировались суточные колеба-

¹ Программный продукт предоставлен Esri по гранту Conservation Program.

ния в распределении метеоэлементов вследствие термической неоднородности подстилающей поверхности. Неравномерный прогрев поверхности обуславливался наличием водных объектов на исследуемых территориях и неодинаковой инсоляцией склонов различных ориентации и наклона. Полученные в ходе моделирования квазистационарные поля метеоэлементов для ряда типичных ситуаций по каждому сезону года описывают микроклимат рассматриваемых территорий. Если в ходе исследования изучался вопрос о распространении примесей, то вместе с моделью гидротермодинамики использовалась также модель переноса примеси (2).

Рассчитанные таким образом поля метеоэлементов для ситуации без учета антропогенного объекта и для варианта, когда во входных данных модели учтены изменения термодинамических свойств подстилающей поверхности, вызванные антропогенным вмешательством, использовались для получения оценок влияния промышленных объектов на циркуляцию и качество атмосферы прилегающих территорий.

5. Использование ГИС-технологий для анализа результатов расчетов

Анализ результатов численных экспериментов и оценка размеров зоны влияния природно-технических объектов на окружающую территорию проводится в среде ГИС. Отображение результатов моделирования на топографической карте территории позволяет локализовать зоны существенного влияния промышленных объектов, а также установить причины некоторых особенностей распределения метеополей.

Результаты моделирования, сформированные в специальном образом организованный текстовый файл, импортируются в среду ГИС, где осуществляются их пространственная привязка и дальнейшее преобразование в тематические векторные и растровые слои. С использованием методов интерполяции строятся поверхности распределений метеоэлементов для каждого сценария и поверхности разностей соответствующих метеополей из параллельных сценарных расчетов [8]. Разности полей вычисляются для упрощения процесса локализации областей изменения метеоэлементов.

Кроме выявления зон значимых изменений в распределении каждого метеоэлемента в отдельности с помощью Калькулятора растров (Raster Calculator), Алгебры карт (Map Algebra) или оверлейных процедур из созданных ранее поверхностей разностей метеополей строятся различные интегральные показатели, учитывающие деформации нескольких метеополей одновременно. На результирующих поверхностях определяются области, в которых будет наблюдаться существенное изменение метеоэлементов в комплексе.

Так как единицы измерения и масштабы значений у всех метеоэлементов разные, то их необходимо нормировать с использованием одной из существующих метрик. Результатом нормировки являются новые растровые поверхности, все ячейки которых получают значения, определяемые, например, формулой

$$m_{\alpha} = \left| \frac{\varphi_{\alpha} - \Delta_{\alpha 1}}{\Delta_{\alpha 2}} \right|,$$

где разным значениям индекса α соответствуют разные метеоэлементы φ_{α} , $\Delta_{\alpha 1}$ — число, отклонения от которого в плане решения конкретных задач представляют наибольший интерес, $\Delta_{\alpha 2}$ — величина разброса значений метеоэлемента φ_{α} . Можно применить

нормировку по дисперсиям ($\Delta_{\alpha 2}$) и математическим ожиданиям ($\Delta_{\alpha 1}$) либо по наилучшим или наихудшим значениям ($\Delta_{\alpha 1}$), $\Delta_{\alpha 2} = \varphi_{\alpha \max} - \varphi_{\alpha \min}$, либо любую другую из существующих [10].

В нашем случае нормировка осуществлялась по формуле

$$m_{\alpha} = |\varphi_{\alpha} / \varphi_{\alpha \max}|, \quad (4)$$

где φ_{α} — нормируемые поля отклонений метеорологических величин, $\varphi_{\alpha \max}$ — их максимальные значения, а итоговый суммарный показатель изменений комплекса метеоэлементов

$$m = \frac{\sum_{\alpha=1}^n m_{\alpha}}{n}, \quad (5)$$

где n — количество суммируемых полей.

Построенные в ГИС тематические векторные и растровые слои с их легендами, представляющие полученные результаты в виде поверхностей распределения основных моделируемых метеоэлементов на карте территории, организовываются и хранятся в геоинформационном каталоге проекта. Все слои имеют общую систему координат. Кроме того, в каталоге хранится используемая в численной модели информация о моделируемой территории, включая исходные данные о подстилающей поверхности, результаты модельных расчетов, а также слои топоосновы и другую информацию по данной территории, играющую в анализе вспомогательную роль. В этом же каталоге хранятся все построенные карты. Организация такого каталога дает возможность быстрого просмотра всех имеющихся данных по проекту, способствует оперативной подготовке любой уточняющей информации по нему, например, по отдельному участку модельной территории, дает возможность изменить способ отображения результатов, по-другому скомпоновать слои, участвующие в анализе, ввести дополнительные сведения о территории и т. д.

6. Примеры расчетов по предложенной методике

Рассмотрим примеры использования методики для оценки возможного изменения температуры, влажности и скорости ветра в зимнее и осеннее время в районе проектируемой Мотыгинской ГЭС на Ангаре. Для проведения исследования была выбрана область моделирования размером $190 \times 180 \times 2.7$ км, охватывающая территорию вокруг предполагаемой зоны затопления, а также часть территории со стороны нижнего бьефа плотины ГЭС.

Шаги горизонтальной регулярной сетки $\Delta x = \Delta y = 1000$ м, вертикальной — первые 15 шагов по 60 м, далее по 100, 150 и 200 м. Всего по вертикальной координате 29 узлов. Базовый шаг по времени $\Delta t = 60$ с. Для зимнего сценария расчетов стратификация фоновой атмосферы предполагалась сильно устойчивой. Фоновый ветер равен нулю. Температура воды в полынье 274 К, температура воздуха на поверхности 253 К. В численных экспериментах длина полыньи принималась равной 20 км. В расчетах осеннего сценария стратификация фоновой атмосферы полагалась устойчивой. Фоновый ветер равен нулю. Температура воды 280 К.

На рис. 1, а представлен фрагмент исследуемой территории с нанесенными изолиниями разности температур двух зимних сценарных расчетов (при наличии и отсутствии

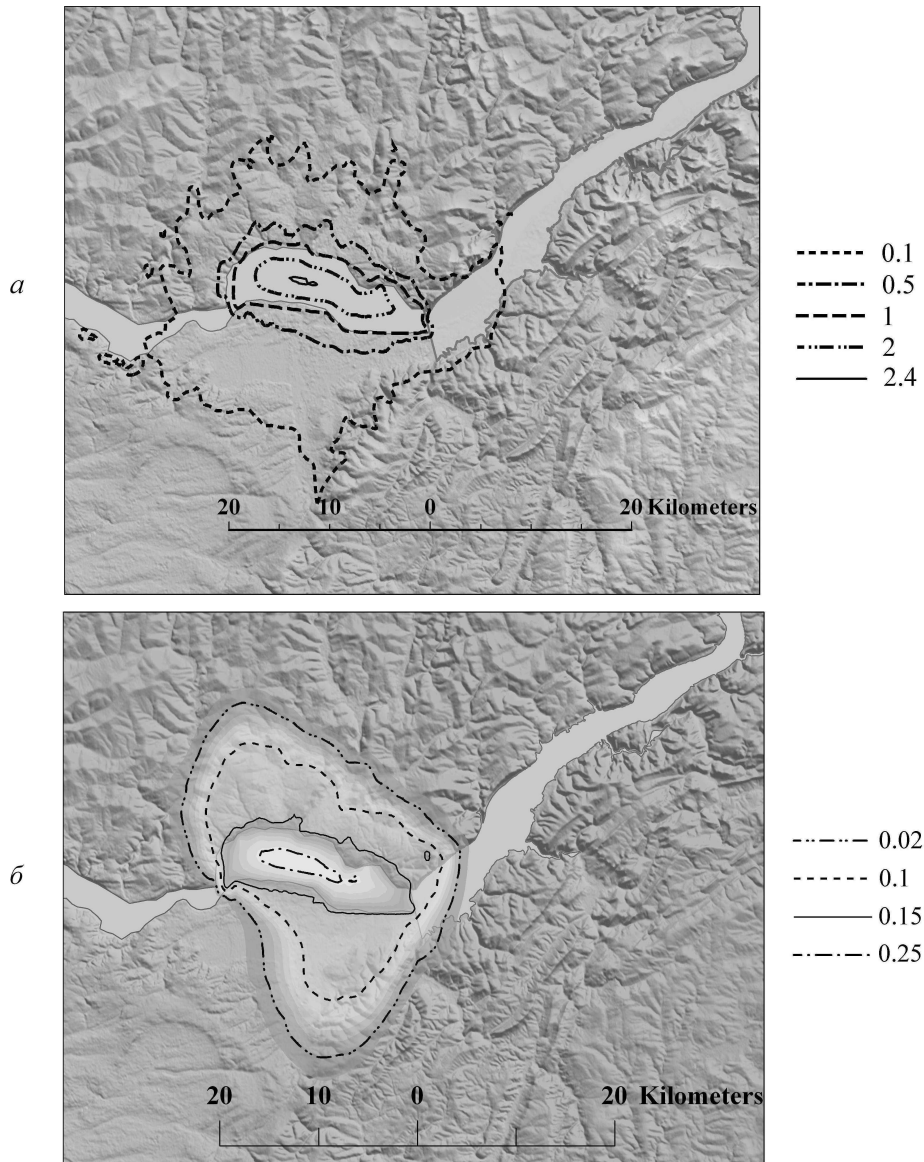


Рис. 1. Изолинии разности температур, град (*а*), и массовой доли водяного пара, г/кг (*б*), на высоте 60 м над поверхностью; зимний сценарий

попыньи), иллюстрирующими зону утепляющего влияния попыньи. Так как температура воды в попынье выше температуры окружающей поверхности, то в прилегающей к ней зоне формируется локальная циркуляция по типу “острова тепла”. Такая циркуляция приводит к тому, что на высоте приземного слоя над центром попыньи наблюдается повышение температуры атмосферы, достигающее в численных экспериментах 2–3 град. Повышение температуры воздуха на 1–2 град по результатам расчетов наблюдается на расстоянии порядка 1 км от попыньи.

В проведенных численных экспериментах для зимнего периода с учетом влияния незамерзающей попыньи Мотыгинской ГЭС с предполагаемой длиной 20 км повышение массовой доли водяного пара на 0.1 г/кг распространяется на 8–10 км от границ попыньи, при этом максимальное увеличение данного показателя на высоте приземного слоя наблюдается непосредственно над попыньей и составляет приблизительно 0.2 г/кг

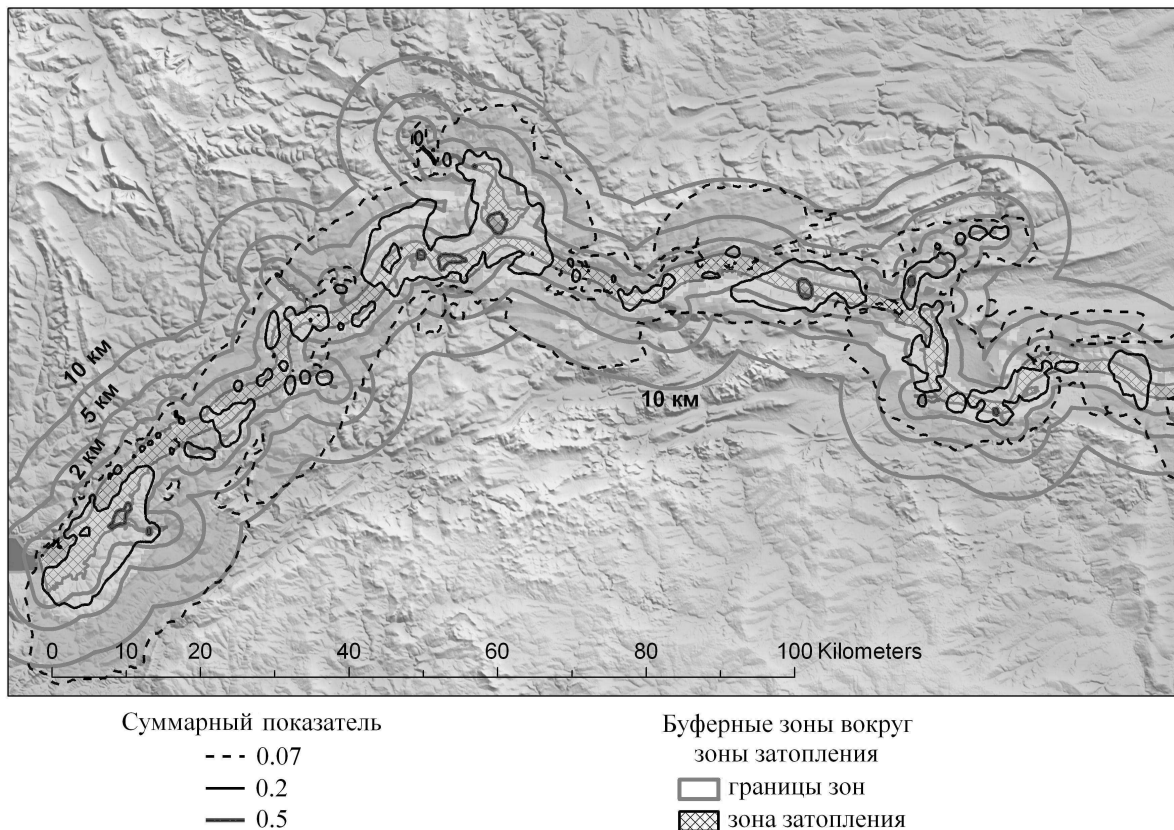


Рис. 2. Суммарный показатель изменений метеорологических полей (температуры, влажности и скорости ветра) на высоте 60 м над поверхностью; осенний сценарий

(рис. 1, б). В целом над полынью и в прилегающей к ней зоне рост относительной влажности с учетом низких зимних температур может достигать 15–17 %.

На рис. 2 выделены зоны прогнозируемого комплексного изменения полей температуры, влажности и скорости ветра на высоте приземного слоя, полученное по расчетам для осеннего модельного сценария. Суммарный показатель изменений метеорологических полей вычислен по формулам (4), (5). Чем больше значение показателя, варьируемое от 0 до 1, тем существеннее ожидаемое комплексное изменение состояния атмосферы.

Анализ результатов численных экспериментов по оценке влияния на гидротермодинамический режим атмосферы прилегающих территорий водохранилища проектируемой Мотыгинской ГЭС позволил дать следующий прогноз: для территорий, удаленных от береговой линии на расстояние 10 км и более, возможны незначительные изменения микроклимата; в ближней зоне влияние водохранилища может быть весьма существенным. В зимний период это прежде всего касается районов, которые непосредственно прилегают к нижнему бьефу плотины и к незамерзающей полынью.

Заключение

Представленный программный комплекс и разработанная на его основе информационно-вычислительная технология для оценки состояния воздушного бассейна позволяют выполнять работы как по прогнозу и оценке возможных микроклиматических изме-

нений и атмосферных загрязнений территории в рамках экологических экспертиз технических проектов (водохранилища ГЭС, ТЭК, ТЭЦ, ГОК и др.), так и по оценке влияния уже существующих промышленных комплексов на качество геоэкологической среды прилегающей к объекту территории. Использование предложенной математической модели может оказать существенную помощь в изучении механизмов распространения загрязняющих веществ в сложных горных условиях и при решении других природоохранных задачах.

Предложенный подход был апробирован на конкретных объектах (Богучанская и Мотыгинская ГЭС на Ангаре) при подготовке информации для экспертных оценок [9, 11–13], результаты которых были использованы также для составления оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС).

Авторы выражают благодарность В.В. Пененко и А.А. Фалейчику за полезные советы и обсуждения в ходе работы.

Список литературы

- [1] ПЕНЕНКО В.В., АЛОЯН А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
- [2] КАЗАКОВ А.Л., ЛАЗРИЕВ Г.Л. О параметризации приземного слоя атмосферы и деятельного слоя почвы // Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 4, № 3. С. 257–265.
- [3] ПЕНЕНКО В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 352 с.
- [4] МАРЧУК Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 456 с.
- [5] ПЕНЕНКО В.В. Численные схемы для адвективно-диффузионных уравнений с использованием локальных сопряженных задач. Новосибирск, 1993 (Препр. ВЦ СО РАН; № 984).
- [6] АЛОЯН А.Е., ФАЛЕЙЧИК А.А., ФАЛЕЙЧИК Л.М. Алгоритм численного решения мезометеорологических задач в случае криволинейной области // Математические модели рационального природопользования. Новосибирск: Наука, 1989. С. 14–35.
- [7] BOYARSHINOVA E.A. Model of dynamics of atmosphere with monotone numerical schemes // Bull. Nov. Comput. Center. Num. Model. in Atmosph., etc., 2000. Iss. 6. P. 1–8.
- [8] ФАЛЕЙЧИК Л.М., ФАЛЕЙЧИК А.А., ПЬЯНОВА Э.А., МАЛЮЖЕНКО А.А. Использование ГИС-технологий для оценки зоны влияния искусственного водоема на микроклимат региона // VII Всерос. научно-практ. конф. “Кулагинские чтения”. Чита: ЧитГУ, 2007. Ч. V. С. 48–53.
- [9] ФАЛЕЙЧИК Л.М., ПЬЯНОВА Э.А. Использование ГИС-технологий и математического моделирования для оценки изменений состояния природной среды под влиянием хозяйственной деятельности человека // Вестник ЧитГУ. 2008. № 5(50). С. 117–127.
- [10] ГЕОИНФОРМАТИКА / Под ред. В.С. Тикунова. М.: Академия, 2005. 480 с.
- [11] ФАЛЕЙЧИК А.А., ФАЛЕЙЧИК Л.М., ПЬЯНОВА Э.А. Исследование влияния искусственного водоема на микроклимат прилегающих территорий с помощью математического моделирования // VII Всерос. научно-практ. конф. “Кулагинские чтения”. Чита: ЧитГУ, 2007. Ч. V. С. 133–137.

- [12] Пьянова Э.А., Фалейчик Л.М. Исследование влияния искусственного водоема на температурные режимы прибрежных территорий // Современные проблемы математического моделирования. Математическое моделирование и современные информационные технологии. Вып. 5. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2007. С. 239–247.
- [13] RYANOVA E.A., FALEYCHIK L.M. Probable temperature regime changes of the atmosphere in Lower Angara region due to anticipated reservoirs // Intern. Conf. on Comput. Informat. Technologies for Environmental Sci. CITES 2009. Program&Abstracts. Russia, Krasnoyarsk, 2009. P. 35.

*Поступила в редакцию 6 июня 2011 г.,
с доработки — 4 августа 2011 г.*