

В.А. Шлычков¹, В.М. Мальбахов², А.А. Леженин²

Численное моделирование атмосферной циркуляции и переноса загрязняющих примесей в Норильской долине

¹ *Институт водных и экологических проблем СО РАН (Новосибирский филиал),*

² *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск*

Поступила в редакцию 17.12.2004 г.

Представлены результаты расчетов локальной циркуляции воздуха вблизи Норильска. Город расположен в местности со сложным рельефом, перепад высот превышает 1000 м. Орографические особенности в окрестностях города обуславливают формирование горно-долинных циркуляций с большим разбросом траекторий и быстроменяющимся направлением переноса. Для описания динамики воздушного потока и перераспределения загрязнителей используется численная модель мезомасштабного пограничного слоя атмосферы, адаптированная для природно-географических условий г. Норильска. Получены модельные оценки выпадений двуокиси серы над территорией в различных метеорологических ситуациях.

Введение

По административному признаку территория г. Норильска относится к Таймырскому автономному округу и расположена за Полярным кругом вблизи параллели 69° с.ш. Город расположен в Норильской долине (длина 170 км, ширина 40–60 км), ориентированной в северо-западном направлении. С юга долина ограничена хребтами Лонгдокойский Камень высотой 600–700 м, а с севера и востока — горными системами Путоран и др. с максимальными отметками свыше 1000 м.

Короткое холодное лето обуславливает высокую чувствительность и малую устойчивость природных комплексов к экологическим нагрузкам. Наибольшую опасность для тундровой зоны представляет нарушение растительного покрова. Малая продолжительность вегетационного периода (60 дней) ограничивает скорость биологического круговорота и определяет низкую способность тундровых экосистем к регенерации. Находясь на пределе своего существования, древесная растительность в тундре при уничтожении не восстанавливается. Вместе с тем вследствие низких температур и подавленного биологического обмена увеличивается устойчивость вредных веществ и происходит их аккумуляция в природных системах.

Лесотундровая растительность весьма чувствительна к атмосферным загрязнителям. Абсорбирующая способность северных лесов по отношению к сернистому ангидриду составляет не более 16–18 кг на 1 га, что в несколько десятков раз ниже, чем в лесной зоне умеренных широт. Некоторые виды мхов и лишайников Крайнего Севера погибают уже при достижении концентрации сернистого ангидрида на уровне 10% от нормативного значения предельно допустимой концентрации (ПДК) в воздухе. Это обстоятельство вместе с низкой экологической емкостью природы повышает риск экологических катастроф.

На территории Норильска расположены предприятия цветной металлургии — ГК «Норильский никель» с валовым объемом выбросов более 2 млн т/год [1], причем большая часть выбросов приходится на двуокись серы. Сернистый ангидрид и сульфаты являются агрессивными соединениями и относятся к числу приоритетных. Загрязнение воздушного бассейна, территорий и водных объектов соединениями серы приводит к различным неблагоприятным последствиям, включая ухудшение здоровья населения, деградацию лесов, закисление внутренних пресных водоемов.

Выбросы ГК столь значительно влияют на северную природу, что отмирание и повреждение растительности наблюдаются на расстояниях свыше 100 км от источника и зона влияния увеличивается со временем [2]. В связи с этим возникает необходимость получения оценок техногенной нагрузки на близлежащие территории и вклада индустриального района в общее загрязнение региона. Помимо выбросов SO₂, представляет интерес достоверное определение потоков примесей через границы региона в аспекте дальнего переноса парниковых газов, оказывающих влияние на климатические параметры сопредельных территорий и планеты в целом. Эта задача становится актуальной в связи с ратификацией РФ Киотского протокола.

Норильский регион характеризуется суровым климатом, обширностью территории и труднодоступностью, что резко ограничивает возможность проведения непосредственных натурных исследований. Моделирование дает возможность воспроизведения атмосферных процессов для описания переноса и трансформации газоаэрозольных примесей и количественных оценок выпадений сульфатов на подстилающую поверхность.

Ниже сформулирована математическая модель мезомасштабного атмосферного пограничного слоя (АПС) для описания локальных процессов на огра-

ниченной территории [3]. Модель предназначена для расчета полей турбулентности, ветра, температуры и влажности в нижней тропосфере. В качестве базовых приняты уравнения гидротермодинамики атмосферы, записанные в приближении глубокой конвекции. Подстилающая поверхность предполагается орографически и термически неоднородной с наличием природно-ландшафтных и антропогенных объектов в виде водоемов, лесов, оголенной почвы, снежного покрова, городских конгломератов, промышленных комплексов и т.п.

Постановка задачи

Введем декартову систему координат (x, y, z) , в которой ось x направлена на восток, y — на север, z вертикально вверх. В качестве исходных примем систему «неупругих» [4] уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска. В термодинамических полях выделим основное («фоновое») течение, отражающее начальную плотностную стратификацию АПС:

$$\begin{aligned} \Theta &= \bar{\Theta}(z) + \theta; T = \bar{T}(z) + T'; \\ P &= \bar{P}(z) + p; \Pi = \bar{\Pi}(z) + \pi, \end{aligned} \quad (1)$$

где Θ , T , P , Π — потенциальная температура, абсолютная температура, давление и функция Экснера (аналог давления) соответственно, переменные с чертой — фоновые поля, удовлетворяющие уравнениям состояния и статики:

$$\bar{P} = R_a \bar{\rho} \bar{T}; \frac{d\bar{P}}{dz} = -\bar{\rho}g; \bar{\Pi} = \frac{\bar{\Theta}}{\bar{T}}. \quad (2)$$

Здесь $\bar{\rho}(z)$ — статическое падение плотности с высотой; g — ускорение силы тяжести; R_a — газовая постоянная воздуха. Исходными считаются уравнения Рейнольдса, полученные как результат осреднения по ансамблю уравнений Навье—Стокса [5]:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\bar{\rho}} w \frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial z} = \\ &= -c_p \bar{\Pi} \frac{\partial \pi}{\partial x} + lv - \frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right), \\ &\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\bar{\rho}} w \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial z} = \\ &= -c_p \bar{\Pi} \frac{\partial \pi}{\partial y} - lu - \frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right), \\ &\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{\bar{\rho}} w \frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial z} = \\ &= -c_p \bar{\Pi} \frac{\partial \pi}{\partial z} + \lambda \vartheta + 0,61gq - \frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right), \\ &\frac{\partial \vartheta}{\partial t} + u \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + v \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \frac{1}{\bar{\rho}} w \frac{\partial \bar{\rho} \vartheta}{\partial z} + S w = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= -\frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) - \frac{1}{\bar{\rho} c_p} \frac{\partial R}{\partial z} + \Phi_T, \\ &\frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial z} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где ϑ — возмущения потенциальной температуры; q — удельная влажность; l — параметр Кориолиса; λ — параметр плавучести; c_p — удельная теплоемкость воздуха; $S = \frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial z}$ — температурная стратификация;

R — поток радиации; Φ_T — фазовые притоки тепла; τ_{ij} — компоненты тензора турбулентных напряжений. Система уравнений (3) является базовой при построении мезомасштабной модели АПС.

Соотношения турбулентного замыкания формулируются в предположении анизотропии процессов по горизонтали и вертикали. Для описания горизонтальной диффузии используется модель Смагоринского, а вертикальная вихревая вязкость рассчитывается с помощью двухпараметрической модели полуэмпирической теории турбулентности. В терминах τ_{ij} модель турбулентности имеет вид [6]:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= K_s D_T, \tau_{yy} = -K_s D_T, \tau_{xy} = \tau_{yx} = K_s D_S, \\ \tau_{zx} &= K_s w_x, \tau_{zy} = K_s w_y, \tau_{xz} = K_z u_z, \\ \tau_{yz} &= K_z v_z, \tau_{zz} = K_z w_z, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$D_T = u_x - v_y, D_S = v_x + u_y$$

— компоненты плоской деформации, а коэффициент турбулентного обмена по горизонтали рассчитывается с помощью соотношения Смагоринского:

$$K_s = \alpha \Delta s \sqrt{D_T^2 + D_S^2};$$

$\Delta s = \Delta x \Delta y$ — площадь элементарной x -, y -ячейки; α — множитель пропорциональности. Для описания турбулентного обмена по вертикали привлекаются эволюционные уравнения для кинетической энергии турбулентности b и скорости ее диссипации ε [7]:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial b}{\partial t} + u \frac{\partial b}{\partial x} + v \frac{\partial b}{\partial y} + \frac{1}{\bar{\rho}} w \frac{\partial \bar{\rho} b}{\partial z} = \\ &= \frac{\partial}{\partial x} K_s \frac{\partial b}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_s \frac{\partial b}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial b}{\partial z} + J_1 - \varepsilon, \\ &\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \frac{1}{\bar{\rho}} w \frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial z} = \\ &= \frac{\partial}{\partial x} K_s \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_s \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + c_2 \frac{\varepsilon}{b} J_1 - c_3 \frac{\varepsilon^2}{b}, \\ &K_z = c_1 \frac{b^2}{\varepsilon}, \end{aligned}$$

где

$$J_1 = \frac{1}{2} K_z (u_z^2 + v_z^2 + w_z^2) - \alpha_0 K_z \lambda \bar{\Theta}_z$$

— источник, пополняющий энергию турбулентности; c_1, c_2, c_3 — универсальные постоянные.

Определим область решения в виде прямоугольного параллелепипеда с неровной нижней границей, отражающей неоднородность рельефа подстилающей поверхности:

$$0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y; \quad \delta \leq z \leq H, \quad (5)$$

где L_x, L_y – размеры области по горизонтали; функция $z = \delta(x, y)$ задает рельеф; H – положение верхней границы. Ограничения на горизонтальные масштабы воспроизводимых явлений связаны с пренебрежением сферичностью земной поверхности в исходных уравнениях и учетом β -эффекта (изменение параметра Кориолиса вдоль меридиана). Упомянутые эффекты можно считать несущественными при размерах области в плане, не превышающих 1000 км.

Базовый набор краевых условий для системы (3) сформулируем в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = 0, \quad x = L_x; \\ \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = 0 \quad \text{при } y = 0, \quad y = L_y. \end{aligned} \quad (6)$$

В нижней части АПС непосредственно у подстилающей поверхности выделим слой постоянных потоков (СПП) толщиной h , в котором вертикальные градиенты полей намного превосходят их значения в вышележащих слоях. В численных моделях АПС обычно используют параметризацию, в основу которой положена теория подобия Мониана–Обухова [8]. Запишем основные соотношения теории подобия, которые служат краевыми условиями на нижней границе области:

$$\begin{aligned} K_z \frac{\partial u}{\partial z} = c_u |\mathbf{u}| u, \quad K_z \frac{\partial v}{\partial z} = c_u |\mathbf{u}| v; \quad w_n = 0; \\ K_z \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = c_T |\mathbf{u}| (\vartheta - \vartheta_0) \quad \text{при } z = h + \delta, \end{aligned} \quad (7)$$

где c_u, c_T – коэффициенты сопротивления и теплообмена, рассчитываемые с помощью модели СПП; ϑ_0 – температура подстилающей поверхности; w_n – нормальный к поверхности Земли компонент скорости.

На верхней границе поставим условия вида

$$u = \mathbf{U}, \quad v = \mathbf{V}, \quad p = p_H, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = S_0 \quad \text{при } z = H, \quad (8)$$

где \mathbf{U}, \mathbf{V} – вектор внешней (крупномасштабной) скорости ветра в свободной атмосфере; p_H – заданное барическое поле; S_0 – статическая устойчивость стандартной атмосферы.

В качестве начальных условий принималось горизонтально однородное стационарное решение задачи при устойчивой стратификации АПС.

Модель переноса и диффузии примеси

Уравнения полуэмпирической теории переноса и диффузии примеси в АПС имеют вид [6]:

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} w \frac{\partial \bar{\rho} \mathbf{C}}{\partial z} - \frac{w_g}{\rho} \frac{\partial \bar{\rho} \mathbf{C}}{\partial z} =$$

$$\begin{aligned} = \frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial}{\partial x} \bar{\rho} K_x \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{\rho} K_y \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{\rho} K_z \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial z} \right) + \\ + I_{\mathbf{C}} + \mathbf{F}(\mathbf{C}), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\mathbf{C}(x, y, z, t)$ – вектор концентрации примеси; $I_{\mathbf{C}}$ – мощность эмиссии; w_g – скорость седиментации; $\mathbf{F}(\mathbf{C})$ – матрица химической трансформации компонентов смеси.

Краевые условия на нижней границе зададим в виде

$$K_z \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial z} = \gamma \mathbf{C} \quad \text{при } z = h + \delta, \quad (10)$$

где γ – скорость сухого (поверхностного) осаждения.

На верхней границе поставим условие

$$K_z \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = H. \quad (11)$$

В процессе переноса сернистый ангидрид SO_2 испытывает химические превращения, трансформируясь в сульфаты и серную кислоту, которые в результате вымывания осадками поступают на подстилающую поверхность в виде кислотных дождей. В данной постановке рассматривается двухкомпонентная примесь $\mathbf{C} = (C_1, C_2)$, содержащая первичную субстанцию $C_1 = \text{SO}_2$ и сульфаты $C_2 = \text{SO}_4^{2-}$.

Учитываемые в модели преобразования примеси состоят в следующем. Эмиссия двуокиси серы в процессе перераспределения в пространстве за счет адвекции, диффузии и вертикального перемешивания частично поглощается подстилающей поверхностью, частично выпадает с осадками, а также превращается в сульфат-ионы. Образовавшиеся сульфаты наряду с переносом и диффузией подвергаются сухому и влажному осаждению. Рассматривая блок химических превращений как отдельный этап метода расщепления, запишем его в покомпонентном виде [9]:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = -k_1 C_1 - n_1 C_1, \quad \frac{\partial C_2}{\partial t} = \beta k_1 C_1 - n_2 C_2, \quad (12)$$

где k_1 – скорость химического превращения SO_2 в сульфаты; n_1, n_2 – скорости вымывания компонентов C_1, C_2 осадками; β – отношение молекулярных масс SO_4^{2-} и SO_2 . Модель (12) апробирована на задачах переноса соединений серы в [10].

Введем криволинейную систему координат [7], в которой поверхность $z = \delta(x, y)$ является координатной плоскостью:

$$x' = x; \quad y' = y; \quad z' = \frac{z - \delta}{1 - \delta/H}. \quad (13)$$

Преобразованные в соответствии с (13) уравнения (3) решались методом конечных разностей по переменным x', y', z', t [3]. Для интегрирования по времени использован неявный метод расщепления в варианте «предиктор–корректор» [11], модифицированный в целях увеличения нормы оператора перехода и повышения устойчивости алгоритма. При решении краевой задачи по вертикали применялись итерации по орографическим слагаемым.

Расчет ветрового режима

Сформулированная модель используется для воспроизведения пространственной структуры воздушного потока в районе Норильска при заданном течении в свободной атмосфере.

Рассмотрим область с размерами в плане 400×400 км и зададим верхнюю границу расчетного параллелепипеда $H = 3\,000$ м. Дискретизацию уравнений проведем на равномерной сетке, содержащей $128 \times 128 \times 90$ узлов, шаг по времени примем равным 90 с.

Расположим начало декартовой прямоугольной системы координат в точке с географическими координатами $67,5^\circ$ с.ш., $83,2^\circ$ в.д. так, чтобы центр области совпадал с центром г. Норильска, а начало отсчета приходилось на левый нижний угол области.

В качестве начальных условий зададим устойчивую температурную стратификацию со стандартным градиентом $S_0 = 0,003$ °C/м, поле ветра при $t = 0$ получим из стационарного решения горизонтально однородной задачи.

Многослойная цифровая карта рельефа SRTM-30 с 30-секундным разрешением (925 м) выбиралась с сайта NASA и интерполировалась на расчетную сетку средствами ГИС.

Учитывая преобладающее западно-восточное направление переноса в свободной атмосфере, зададим скорость зонального течения в виде $U = 10$ м/с, $V = 0$. Эти параметры определяют правые части краевых условий (8). Решалась задача на установление, суточный ход метеорологических параметров не учитывался. Цель численного эксперимента состояла в получении пространственного распределения скорости ветра, обусловленного орографическим вынуждением.

Вертикальное распределение модельных компонентов скорости u , v в точке $x = 92$ км, $y = 3$ км (примерно соответствующей местоположению г. Игарка) сопоставлялось с имеющимися у нас среднестатистическими профилями скорости ветра по аэрологическим данным метеостанции Игарка. Обнаружилось качественное согласие полей скорости, а именно – формирование приземного возвратного течения ($u < 0$) в нижних слоях при $z < 300$ м, поворот ветра с высотой по часовой стрелке в средней части АПС и установление западно-восточного переноса к уровню $z = 3$ км.

Модельная скорость ветра в Норильске имеет достаточно сложную вертикальную структуру (рис. 1). Вблизи земли ветер направлен с северо-запада вдоль Норильской впадины. Выше вектор скорости испытывает вращение, так что в слое $1\,000 < z < 1\,500$ м формируется противоток, обусловленный обтеканием плато Путоран. Еще выше ($z \approx 1\,600$ м) расположена застойная зона, где модуль скорости близок к нулю. С приближением к верхней границе области суммарный угол поворота скорости превышает 360° .

В целом западный поток испытывает торможение вследствие влияния высоких хребтов в восточной

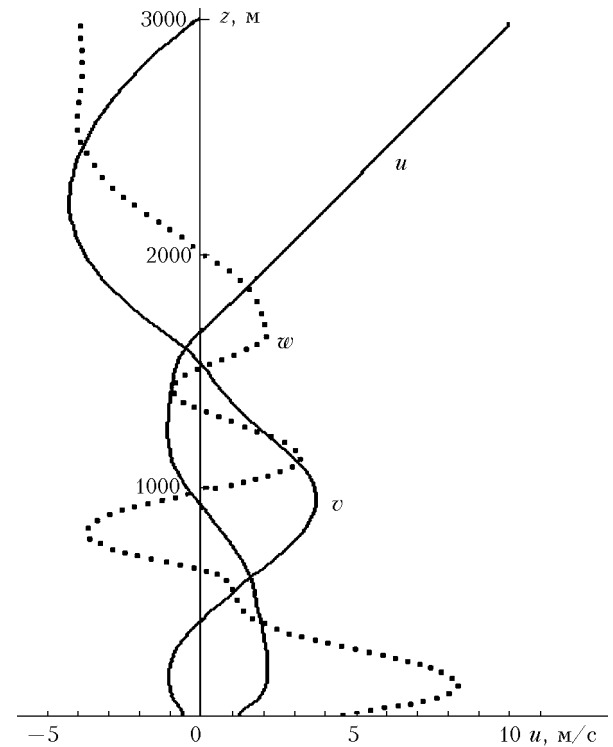


Рис. 1. Расчетные профили зональной (u) и меридиональной (v) составляющих скорости ветра в Норильске. Пунктир – распределение вертикальной скорости w

части области. Сложную структуру ветра отражает изменчивый по высоте профиль w , построенный по максимальному значению 8 см/с.

Для анализа поля скоростей был проведен расчет траекторий в горизонтальной плоскости на разных уровнях. В приземном слое частицы перемещаются преимущественно в юго-восточном направлении, что соответствует ориентации Норильской впадины. Долина с высокими бортами образует своеобразный каньон, который вынуждает западный поток совершать поворот в южном направлении и двигаться вдоль склонов.

На высоте 1 000 м формируется сравнительно слабый ветер северо-восточного направления и частицы смещаются против основного потока. Ближе к верхней границе ($z = 2\,000$ м) происходит поворот ветра за счет сил Кориолиса. Течение приобретает организованную структуру с преобладанием юго-западного ветра. Становится отчетливым эффект огибания высоких восточных хребтов. Отдельные частицы, попадая в зоны дивергенции или конвергенции, значительно удаляются от исходного уровня и могут поменять направление перемещения.

Резюмируя, следует отметить, что топографические особенности местности в районе Норильска играют определяющую роль при формировании стационарных или медленно меняющихся течений. Поле ветра имеет существенно неоднородную структуру по горизонтали и сильную изменчивость по высоте. На разных уровнях адвекция может иметь самое разное направление, включая возвратные течения, застойные зоны, замкнутые роторы.

Расчет поля концентрации и выпадений SO_2

Расчитанные поля скорости ветра и турбулентности использовались для получения оценок загрязнения территории и воздушного бассейна выбросами двуокиси серы от ГМК «Норильский никель». Валовой объем выбросов SO_2 условно взят 2 млн т/год, что в пересчете составляет около 63,5 кг/с. Интегрирование уравнений (9) проводилось до момента установления стационарного режима, при котором пространственная структура поля концентрации не менялась со временем.

Имея в виду предварительный характер расчетов, а также учитывая, что на сравнительно небольших расстояниях от источника химическая трансформация SO_2 не играет значительной роли, ограничимся случаем пассивного переноса однокомпонентной примеси, полагая в (12) $C_2 = 0$, $k_1 = 0$.

Согласно (12) выведение примеси из атмосферы реализуется двумя механизмами: сухим осаждением на подстилающую поверхность, учитываемым в виде граничного условия (10), и вымыванием осадками. Расчеты показали, что на временных масштабах порядка суток и на дистанциях десятки километров второй механизм является доминирующим. При этом чувствительность модели к вари-

ациям параметра n_1 (скорость вымывания) значительно выше, чем к γ_1 (сухое осаждение).

Принятое в [9] значение n_1 , равное 10^{-4} с^{-1} , ориентировано на использование в модели МСЦ-В для описания трансграничного переноса соединений серы на территориях с характерными масштабами 1000 км. Упомянутое значение n_1 опирается на среднестатистическую структуру крупномасштабных осадков и в рамках мезомасштабного моделирования дает сильно завышенные объемы выпадений вблизи источника. В связи с этим параметризацию влажного выведения проведем физически более обоснованным способом, используя механизм седиментации. Зададим в (9) $w_g = 10^{-3} \text{ м/с}$ – скорость выпадения примеси, увлекаемой осадками. Для сухого осаждения используем рекомендованную в [9] величину $\gamma_1 = 0,012 \text{ м/с}$.

На рис. 2 представлены изолинии концентрации SO_2 в приземном слое воздуха. Максимум концентрации оказался смещенным к юго-востоку примерно на 60 км, а экстремальные значения превышают величину 1 мг/м^3 . Для сравнения укажем, что нормативная среднесуточная ПДК составляет $0,05 \text{ мг/м}^3$. Отметим, что на высотах конфигурация поля концентрации меняется. Так, при $z = 900 \text{ м}$ шлейф примеси вытягивается к северу по среднему направлению ветра на этой высоте.

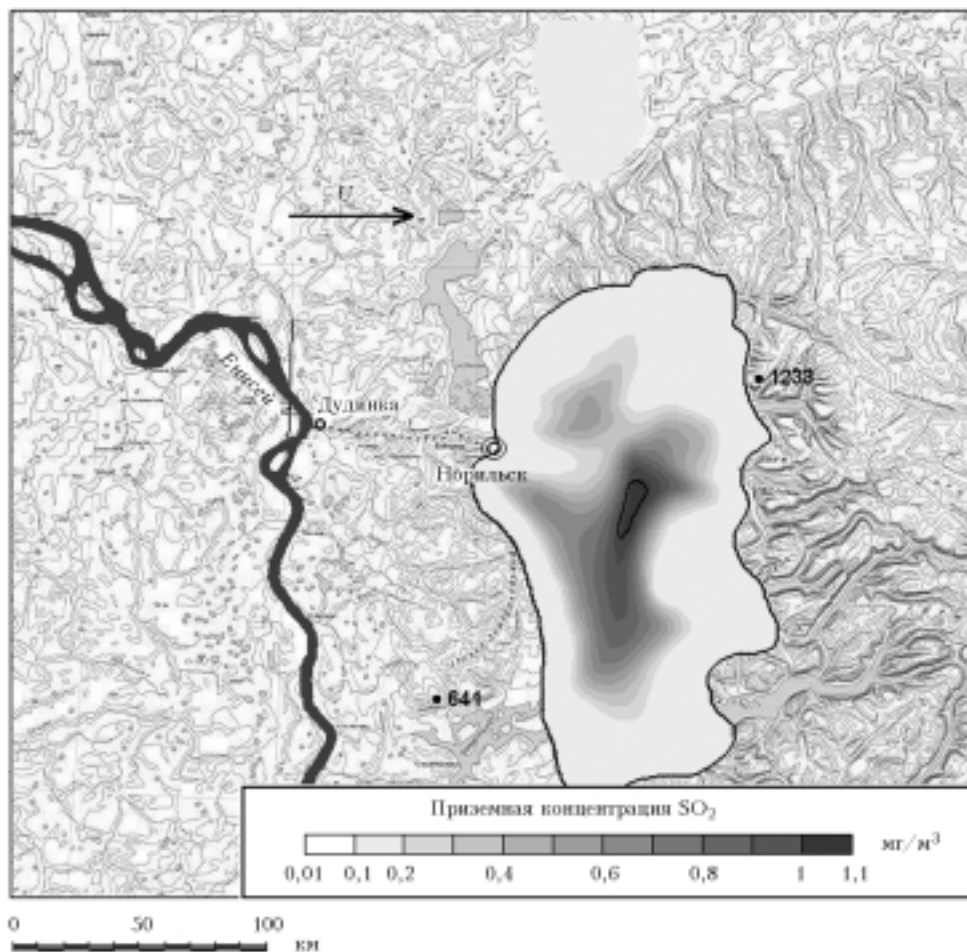


Рис. 2. Изолинии поля приземной концентрации SO_2

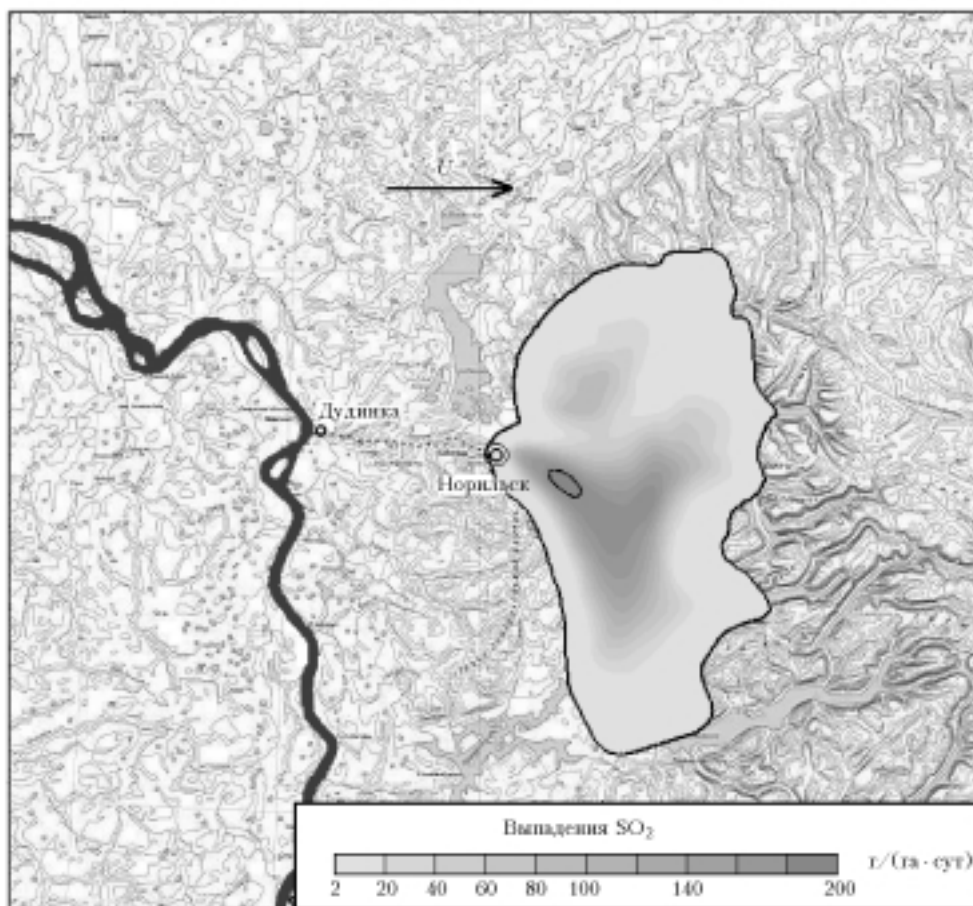


Рис. 3. Изолинии поля выпадений SO_2

В процессе выведения двуокись серы осажда-ется на подстилающую поверхность. Скорость накопления примеси на Земле иллюстрирует рис. 3. Максимум выпадений наблюдается на расстоянии 40–60 км от центра эмиссии. Согласно космической информации [2] именно в этом районе регистрировалась массовая гибель лиственницы. В целом отмеченная на рис. 3 территория близка к расположению площади угнетенных лесов [2].

Заключение

Представлена математическая модель мезомасштабного пограничного слоя атмосферы с возможностью воспроизведения турбулентных течений в сложных физико-географических условиях. В основу модели положены уравнения гидротермодинамики, записанные в приближении глубокой конвекции, что позволяет описать волновые процессы орографической природы в нижней и средней тропосфере.

На основе проведенного исследования было бы преждевременно давать реальные оценки загрязнения территории Норильского региона — хотя бы потому, что отсутствие базы репрезентативных данных измерений не позволило провести полноценную калибровку внутренних параметров модели.

Вместе с тем представленные предварительные результаты позволяют констатировать, что мезомасштабная модель АПС более или менее адекватно воспроизводит основные черты локальной атмосферной циркуляции и особенности переноса поллютантов в условиях Норильской долины.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 03-05-65279.

1. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 255 с.
2. Харук В.И., Винтербергер К., Цибульский Г.М., Яхимович А.П. Анализ техногенной деградации притундровых лесов по данным съемки из космоса // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 91–97.
3. Шлычков В.А. Численная модель пограничного слоя атмосферы с детализацией конвективных процессов на основе вихреразрешающего подхода // Аэрозоли Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 612 с.
4. Вельтищев Н.С., Желнин А.А. Численная модель влажной глубокой конвекции // Тр. Гидрометцентра СССР. 1981. Вып. 238. С. 36–48.
5. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 351 с.
6. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.

7. *Илюшин Б.Б., Курбацкий А.Ф.* О применимости $E - l$ и $E - \epsilon$ моделей турбулентности к нейтральному горизонтально однородному атмосферному пограничному слою // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1994. Т. 30. № 5. С. 615–622.
8. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Т. 1. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 694 с.
9. *Модельные* оценки выпадений соединений серы вблизи источников загрязнения и на подсеточном уровне (Субрегион г. Санкт-Петербурга). М., ЕМЕР/МСЦ-В. Отчет 9/95. 1995. 52 с.
10. *Шлычков В.А.* Расчет влияния выбросов Экибастузской ГРЭС на загрязнение территории Западной Сибири в результате дальнего атмосферного переноса // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 598–601.
11. *Марчук Г.И.* Методы вычислительной математики. Новосибирск: Наука, 1973. 352 с.

V.A. Shlychkov, V.M. Malbakhov, A.A. Lezhenin. **Numerical modeling of atmospheric circulation and pollution transport in the Norilsk suburb.**

Calculation results for local air circulation in the Norilsk suburb are presented. The city is located in the area with a complex topography with elevation change more than 1000 m. Orographical features in the city vicinities cause a formation of mountain-and-valley circulation with a wide scatter of trajectories and a fast changing transport direction. To describe air flow dynamics and pollutants' redistribution the numerical model of mesoscale atmospheric boundary layer was used. The model was adapted for the Norilsk natural-geographical conditions. The model values of sulphur dioxide fallout over the area for different meteorological situations were obtained.