

УДК 551.511.42.001.572(571.14)

Численный анализ атмосферной циркуляции и распространения загрязняющих примесей в окрестностях Норильского промышленного района

А.А. Леженин¹, В.Ф. Рапута¹, Т.В. Ярославцева^{2*}

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

²Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены Роспотребнадзора
630108, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7

Поступила в редакцию 19.01.2016 г.

С использованием численной мезомасштабной модели атмосферного пограничного слоя для типичных метеорологических условий проведено исследование динамики воздушных потоков в Норильской долине. Показано, что орографические особенности территории формируют горизонтально-неоднородное и изменчивое по высоте поле ветра. На данных экспедиционных исследований загрязнения снежного покрова в окрестностях Норильского медеплавильного завода выполнена численная реконструкция полей локальных и региональных выпадений пыли и тяжелых металлов.

Ключевые слова: атмосфера, снежный покров, загрязнение, численное моделирование, реконструкция; atmosphere, snow cover, pollution, numerical modeling, reconstruction.

Введение

Выбросы загрязняющих веществ предприятия Норильского промышленного района (НПР) значительно влияют на северную природу и вызывают деградацию растительности, что наблюдается на расстояниях до 200 км от промзоны. Это подтверждается как анализом данных наземных наблюдений, так и космическими снимками [1–5]. Объем промышленных выбросов в атмосферу составляет около 2 млн т в год, причем основными загрязнителями являются сернистые соединения [6–8]. Центром НПР является г. Норильск. Город расположен за Полярным кругом вблизи параллели 69° с.ш. в долине, ориентированной в северо-западном направлении длиной около 170 км, шириной 40–60 км. С юга долина ограничена хребтом Лонгдокойский Камень высотой 600–700 м, а с севера и востока — горными массивами плато Путорана с максимальными отметками высот свыше 1000 м.

Орографические особенности рассматриваемой территории способствуют формированию горно-долинных циркуляций с большим разбросом траекторий и быстроменяющимися направлениями ветра. Методы гидродинамического моделирования атмосферной циркуляции в Норильской долине позво-

ляют проводить анализ процессов переноса и трансформации загрязняющих примесей в атмосфере и их аэрозольных выпадений на поверхность Земли [9]. Но, к сожалению, при таком подходе приходится в основном ограничиваться лишь сценарными расчетами, что обусловлено реальными возможностями обеспечения используемых моделей достоверной входной информацией. Сведения о параметрах источников, химическом и дисперсном составе выбрасываемых примесей носят отрывочный характер. К числу основных причин создавшегося положения следует отнести информационную закрытость проблем окружающей среды по отношению к территориям НПР, недостаточный объем систематических мониторинговых исследований, пригодных для численного анализа процессов загрязнения.

В силу вышеперечисленных причин возникает необходимость постановок соответствующих обратных задач, основанных на совместном использовании модельных описаний процессов переноса примеси и данных наземного и спутникового мониторинга полей загрязнения [10–12]. При организации сети наземного мониторинга следует учитывать информацию о действующих источниках загрязнения атмосферы, характеристиках загрязняющих веществ, гидрометеорологических и климатических условиях, дальнем переносе примесей и т.д. [13–15]. Для получения более полных пространственно-временных оценок техногенного загрязнения территорий целесообразно использовать данные дистанционного зондирования Земли [2, 16, 17].

* Анатолий Александрович Леженин (lezhenin@ommfao.sscs.ru); Владимир Федотович Рапута (raputa@ssc.ru); Татьяна Владимировна Ярославцева (tani-ta@list.ru).

Численное моделирование атмосферной циркуляции в Норильской долине

В природоохранной практике широко применяется метод численного моделирования турбулентных течений в пограничном слое атмосферы в сложных физико-географических условиях. Математическое моделирование позволяет воспроизвести атмосферные процессы для описания переноса и трансформации газоаerosольных примесей и количественных оценок выпадений загрязнителей на подстилающую поверхность [9, 12, 18].

Для исследования атмосферной циркуляции в Норильской долине использовалась гидродинамическая модель мезомасштабного атмосферного пограничного слоя (АПС) [9]. 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.

Основная цель численных экспериментов состояла в получении пространственного распределения скорости ветра, обусловленного орографическими неоднородностями, анализе структуры воздушных течений и сопоставлении результатов расчетов с данными наблюдений. Размеры расчетной области задавались в плане $400 \times 400 \text{ км}^2$ с верхней границей $H = 3000 \text{ м}$ с центром в г. Норильске. Дискретизация уравнений была проведена на равномерной сетке, содержащей $128 \times 128 \times 90$ узлов. Суммарное число расчетных узлов составляет, таким образом, около 1,5 млн, а элементарный объем равен $3100 \times 3100 \times 30 \text{ м}^3$. На верхней границе расчетной области были заданы компоненты зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, равные $U_H = 10 \text{ м/с}$ и $V_H = 0$ соответственно.

На рис. 1, а представлено вертикальное распределение рассчитанных по модели зональной u и меридиональной v компонентов скорости в точке, примерно соответствующей местоположению г. Норильска, а на рис. 1, б изображены среднестатистические профили составляющих горизонтальной скорости ветра по данным аэрологической станции, расположенной вблизи города.

Сопоставление расчетного и фактического распределения скорости ветра на рис. 1 показывает качественное сходство полей, а именно – формирование приземного возвратного течения ($u < 0$) в нижних слоях при высотах менее 300 м, поворот ветра с высотой по часовой стрелке в средней части АПС и установление западно-восточного переноса к уровню 3000 м. Видно, что модельная скорость ветра в Норильской долине имеет сложную вертикальную структуру.

Наглядной формой интерпретации сложных течений является функция тока. Однако в простран-

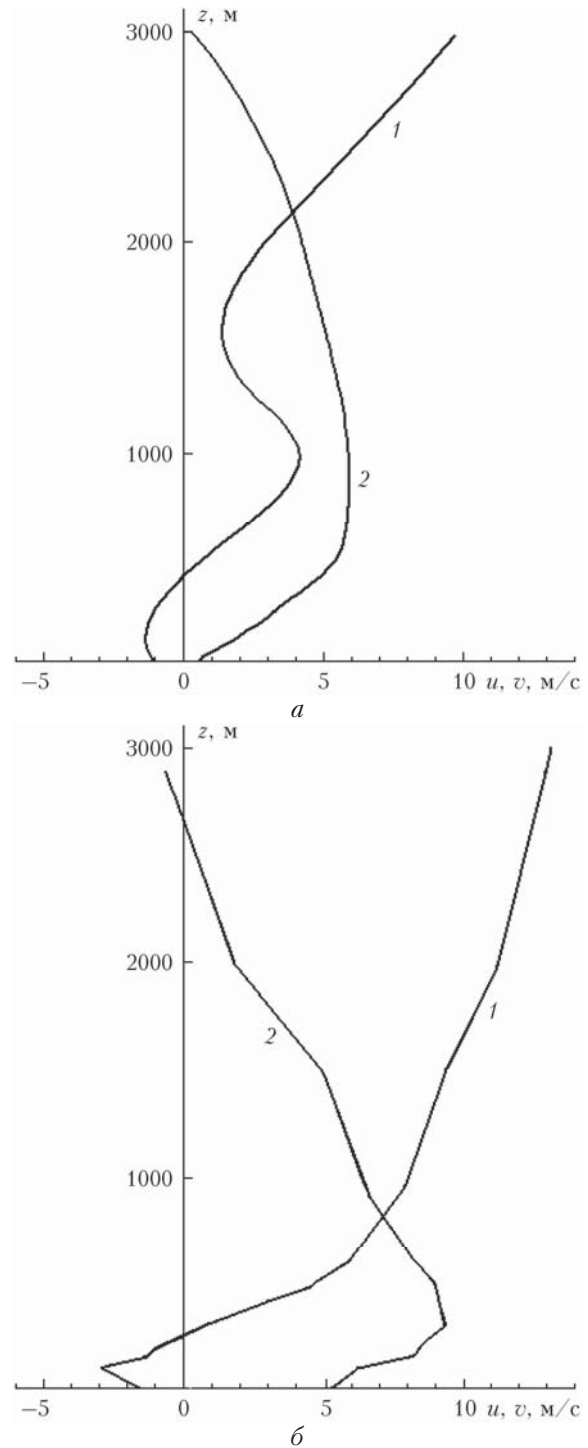


Рис. 1. Расчетные (а) и наблюдаемые (б) профили зональной (1) и меридиональной (2) составляющих горизонтальной скорости ветра в г. Норильске

ственной модели ее построение невозможно. Поэтому для иллюстрации поля скоростей был проведен расчет траекторий в горизонтальной плоскости на разных уровнях. Уравнения параметрического описания пучка траекторий имеют вид

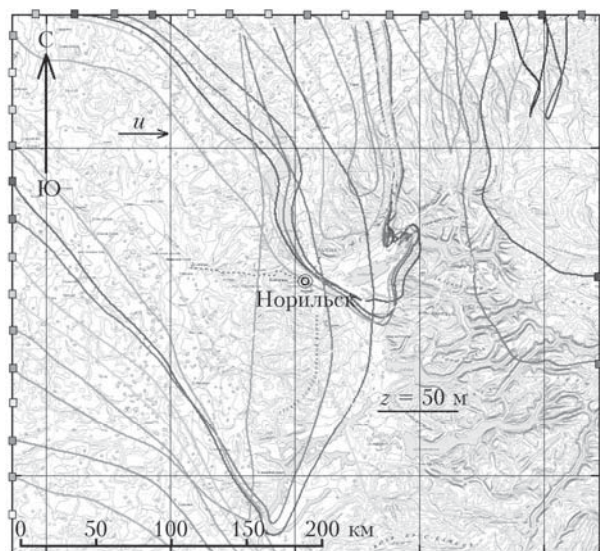
$$\frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v, \quad \frac{dz}{dt} = w,$$

причем отдельная траектория индивидуализировалась начальными условиями

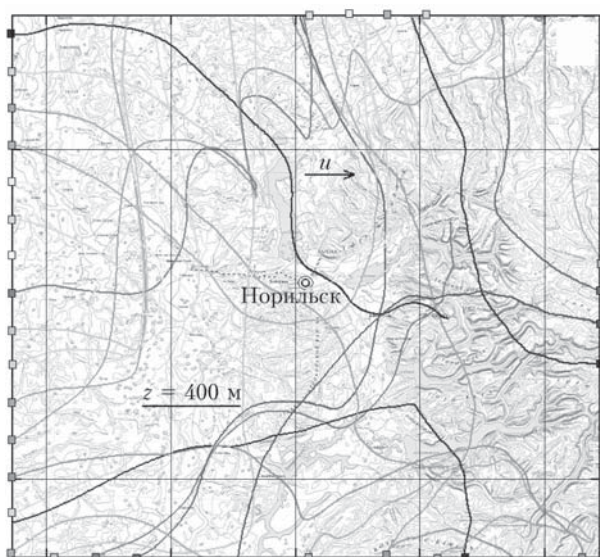
$$x = x_0, \quad y = y_0, \quad z = z_0.$$

Здесь w – вертикальная компонента скорости ветра.

Анализируются пары точек (x_0, y_0) , принадлежащие боковым границам на фиксированном уровне z_0 . Построение траекторий проводилось только для частиц, входящих в расчетную область (рис. 2). Начальное положение частиц обозначено квадратами. Трехмерная траектория, задаваемая уравнениями $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$, проецировалась на расчетные уровни. Пучок траекторий на уровне $z = 50$ м (рис. 2, а) характеризует приземную картину течения. Большинство частиц перемещается в юго-восточном направлении, что соответствует ориентации Норильской долины. Ее борта образуют своеобразный каньон, который вынуждает западные потоки



а



б

Рис. 2. Проекция траекторий при $z = 50$ м (а); 400 м (б)

воздуха поворачивать в южном направлении и двигаться вдоль склонов. Траектории в восточной части области (рис. 2, б) имеют сложную структуру, обусловленную влиянием рельефа. В некоторых случаях при попадании в циркуляционные ячейки частицы остаются в расчетной области длительное время. К такому же эффекту приводит также попадание частицы в застойную зону (рис. 2, а). На уровне $z = 400$ м (рис. 2, б) совокупность траекторий становится более хаотичной. Это связано с высокой пространственной неоднородностью вертикальных токов. Попадая в восходящие или нисходящие потоки, частицы оказываются на разных высотах, где их последующее перемещение определяет неоднородный по высоте вектор горизонтальной скорости. Из рис. 2, б следует, что на высоте ветер может быть направлен внутрь области со всех четырех границ.

Отметим, что топографические особенности местности в районе Норильска играют важную роль при формировании стационарных или медленно меняющихся воздушных течений. Поле ветра имеет неоднородную структуру по горизонтали и сильную изменчивость по высоте.

Реконструкция полей аэрозольных выпадений пыли в окрестностях Норильского медеплавильного завода

Согласно [12] поле плотности длительных выпадений тяжелой неоднородной примеси в ближней зоне от источника описывается соотношением

$$\Pi(r, \varphi, \theta) = \sigma(r, \theta)P(\varphi + 180^\circ), \quad (1)$$

где r , φ – полярные координаты с источником в начале координат; $P(\varphi)$ – осредненная в слое оседания повторяемость направлений ветра; $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ – вектор неизвестных параметров;

$$\sigma(r, \theta) = \theta_1 r^{-\theta_2} \exp\left(-\frac{\theta_3}{r}\right). \quad (2)$$

Следует отметить, что регрессионную зависимость (2) предпочтительно применять для анализа полей выпадений частиц с высокими скоростями оседания.

На больших расстояниях от источника аэрозольные выпадения примесей будут представлены слабооседающими фракциями частиц. В этом случае для описания плотности выпадений в радиальном направлении более пригодно следующее соотношение [19]:

$$\sigma(r, \lambda) = \frac{\lambda}{r}, \quad (3)$$

где λ – агрегированный параметр, зависящий от мощности источника, толщины слоя перемешивания и средней в нем скорости ветра.

Оценку вектора параметров $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и λ в выражениях (2), (3) можно провести методом наименьших квадратов по данным наблюдений плотности выпадений примеси на радиальном маршруте.

На данных экспедиционных исследований загрязнения снежного покрова в окрестностях Норильского медеплавильного завода, выполненных в 1993 г. и опубликованных в [3], проведем апробацию вышеописанных моделей оценивания загрязнения местности. На рис. 3 указано положение источника, схема отбора проб и восстановленное поле выпадений свинца. Для реконструкции полей аэрозольных

выпаждений в ближней и дальней зонах использовались модели (2) и (3) соответственно. Результаты восстановления содержания в снеге твердого осадка, тяжелых металлов в направлении маршрута отбора проб представлены на рис. 4.

Проведенное численное моделирование подтверждает достаточно высокий уровень соответствия измеренных и вычисленных концентраций. Выпадения

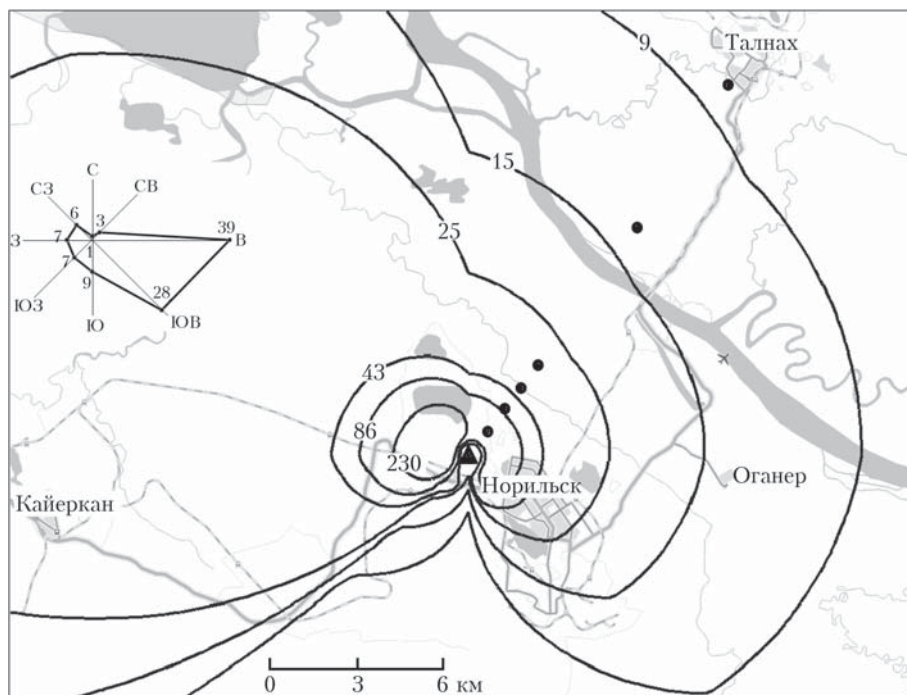


Рис. 3. Схема отбора проб снега. Измеренное и восстановленное по моделям (1)–(3) поле выпадений свинца (мкг/л) в окрестностях Норильского медеплавильного завода: ▲ – источник выброса; ● – точки отбора проб

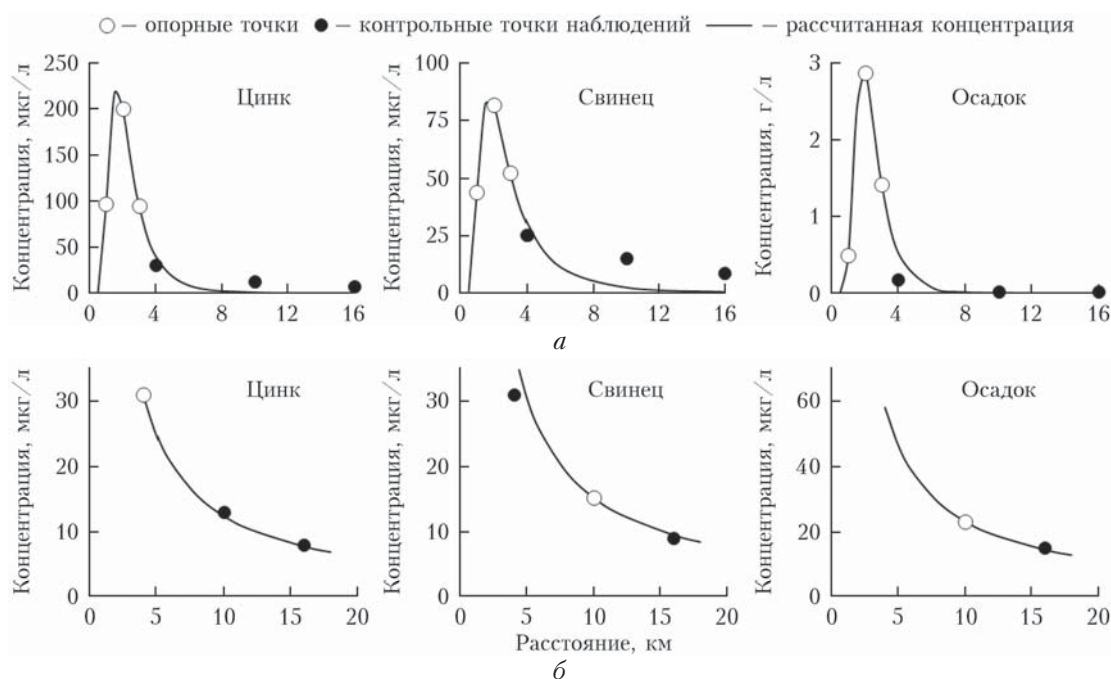


Рис. 4. Измеренные и восстановленные содержания цинка, свинца, твердого осадка по модели (2) в ближней зоне (а) и по модели (3) в дальней зоне (б) в северо-восточном направлении от Норильского медеплавильного завода

примесей в ближней зоне представлены в основном крупными аэрозольными фракциями, на расстояниях более 4 км пыль и тяжелые металлы переносятся на слабооседающих частицах.

Заключение

Представленные результаты позволяют констатировать, что мезомасштабная модель АПС вполне адекватно воспроизводит основные черты локальной атмосферной циркуляции в Норильской долине. Установлено, что орографические особенности территории формируют горизонтально-неоднородное и изменчивое по высоте поле ветра. Выполнен численный анализ данных наблюдений аэрозольного загрязнения снежного покрова в окрестностях Норильского медеплавильного завода. При наличии весьма ограниченной входной информации восстановлены поля длительных выпадений пыли и тяжелых металлов.

Следует также отметить, что, несмотря на значительную изменчивость поля ветра как по вертикали, так и по горизонтали, длительные аэрозольные выпадения примесей от Норильского медеплавильного завода в зимний период времени вполне удовлетворительно описываются соотношениями вида (2), (3). Полученные количественные закономерности аэрозольного загрязнения в окрестности техногенного источника могут быть использованы для установления функциональных связей с яркостными характеристиками снежного покрова при анализе данных дистанционного зондирования поверхности Земли в видимом диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16.

1. Корец М.А., Рыжкова В.А., Данилова И.В. Использование ГИС для оценки состояния наземных экосистем Норильского промышленного района // Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 887–902.
2. Харук В.И., Винтербергер К., Цибульский Г.М., Яхмлович А.П. Анализ техногенной деградации притундровых лесов по данным съемки из космоса // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 91–97.
3. Игамбердиев В.М., Терешенков О.М., Кутыев Х.А., Попова Е.Н. Оценка современного состояния природной среды: Норильский промышленный район // Народное хозяйство республики Коми. Сыктывкар, 1994. Т. 3. С. 54–61.
4. Савченко В.А. Экологические проблемы Таймыра. М.: СИП РИА, 1998. 194 с.
5. Менщиков С.Л., Ившин А.П. Закономерности трансформации притундровых и таежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 290 с.
6. Онуцин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Трефилова О.В., Данилова И.В. Загрязнение снежного по-

крова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района // Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 1025–1037.

7. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 255 с.
8. Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Краснов О.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района. Ч. 3. Распространение примесей // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 9. С. 798–805.
9. Шлычков В.А., Мальбахов В.М., Леженин А.А. Численное моделирование атмосферной циркуляции и переноса загрязняющих примесей в Норильской долине // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 490–496.
10. Таловская А.В., Рапута В.Ф., Филлимоненко Е.А., Языкков Е.Г. Экспериментальные и численные исследования длительного загрязнения снежного покрова ураном и торием в окрестностях теплоэлектростанции (на примере Томской ГРЭС-2) // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 642–646.
11. Pitovranov S.E., Fedorov V.V., Edwards L.L. Optimal sampler siting for atmospheric tracer experiments taking into account uncertainties in the wind field // Atmos. Environ. A. 1993. V. 27, N 7. P. 1053–1059.
12. Рапута В.Ф., Шлычков В.А., Леженин А.А., Романов А.Н., Ярославцева Т.В. Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 713–718.
13. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 182 с.
14. Шевченко В.П., Воробьев С.Н., Куртотин С.Н., Крицков И.В., Манасытов Р.М., Покровский О.С., Политова Н.В. Исследование нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 499–504.
15. Юсупов Д.В., Радомская В.И., Павлова Л.М., Трутнева Н.В., Ильенок С.С. Тяжелые металлы в пылевом аэрозоле северо-западной промышленной зоны г. Благовещенска (Амурская область) // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 10. С. 906–910.
16. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного техногенного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорол. и гидрол. 2013. № 3. С. 94–106.
17. Катаев М.Ю., Беккерев А.А. Обнаружение экологических изменений природной среды по данным спутниковых измерений // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 652–656.
18. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О., Загайнов В.А. Динамика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере с учетом гетерогенных процессов // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2010. Т. 46, № 5. С. 657–671.
19. Рапута В.Ф., Олькин С.Е., Резникова И.К. Методы численного анализа данных наблюдений регионального загрязнения территорий площадным источником // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 558–562.

A.A. Lezhenin, V.F. Raputa, T.V. Yaroslavtseva. Numerical analysis of atmospheric circulation and pollution transport in vicinity of the Norilsk industrial region.

Using a numerical mesoscale model of the atmospheric boundary layer the dynamics of air streams in the Norilsk valley is investigated. Results of calculations for typical weather conditions are presented. It is shown that the orographic peculiarities of the region form a wind field, nonhomogeneous in the horizontal and highly variable in the vertical. With data on pollution of the snow cover in vicinity of the Norilsk copper plant a numerical reconstruction of fields of dust and heavy metals sedimentation is carried out.