

УДК 614.71:551.51

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПЫЛЬЮ ПО ДАННЫМ СНЕГОСЪЁМКИ НА ОСНОВЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ ВЫПАДЕНИЙ*

А.Ф. Щербатов¹, В.Ф. Рапута², В.В. Турбинский³, Т.В. Ярославцева³

¹Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Новосибирской области, Россия, г. Новосибирск, ул. Челюскинцев, 7а, 630132

²ФГБУН «Институт вычислительной математики и математической геофизики» Сибирского отделения РАН, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 6, 630090

³ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 52, 630091

Обсуждаются результаты натурных исследований загрязнения снежного покрова неорганической пылью в окрестностях промышленного предприятия по производству цемента в зимнем сезоне 2012/2013 гг. На основе численной реконструкции поля выпадений показано существование устойчивых количественных закономерностей содержания пыли в снежном покрове по радиальным относительно основного источника направлениям. Восстановлено суммарное поле выпадений пыли и проведена оценка её выбросов в атмосферу в рассматриваемом зимнем сезоне.

Ключевые слова: загрязнение, снежный покров, цементная пыль, численное моделирование, реконструкция.

Оценка экспозиции является краеугольным элементом оценки риска для здоровья. В этой связи повышение качества оценки экспозиции рассматривается как актуальная задача, требующая широкого применения современных методов сочетания расчетных и инструментальных данных.

Среди основных примесей, загрязняющих атмосферный воздух, важное место занимают взвешенные вещества. Они содержатся в большинстве видов промышленных, энергетических и автотранспортных выбросов в атмосферу и являются достаточно простым и весьма удобным индикатором загрязнения окружающей среды.

Распределение пыли в различных компонентах окружающей среды может визуально фиксировать источники загрязнения и зоны их воздействия.

Оценка содержания пыли в атмосфере городов и промышленных площадок проводится с использованием как стационарных, так и передвижных постов наблюдений. Однако в условиях крупных городов со сложной промышленно-селитебной застройкой из-за недостаточной плотности сети наблюдений возникают проблемы их пространственно-временной интерполяции на всю территорию. Наиболее значительные трудности появляются при оценивании

© Щербатов А.Ф., Рапута В.Ф., Турбинский В.В., Ярославцева Т.В., 2014

Щербатов Александр Федорович – руководитель Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Новосибирской области (e-mail: upravlenie@54.rospotrebnadzor.ru; тел.: 8 (383) 220-26-78).

Рапута Владимир Федотович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (e-mail: raputa@ssc.ru; тел.: 8 (383) 33-06-151)

Турбинский Виктор Владиславович – доктор медицинских наук, доцент, директор ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (e-mail: rector@ngmu.ru; тел.: 8 (383) 222-32-04).

Ярославцева Татьяна Владимировна – кандидат химических наук (e-mail: ngi@cn.ru, тел.: 8 (383) 343-34-01).

* Работа выполнена при поддержке Программы РАН 4.9 и отраслевой научно-исследовательской программы «Гигиеническое обоснование минимизации рисков для здоровья населения России» (на 2011–2015 гг.) программы Роспотребнадзора по гигиенической оценке и минимизации риска для здоровья населения.

длительного загрязнения территорий города, и в этом плане перспективно использование данных мониторинга загрязнения снежного покрова [2].

Сопряжёнными исследованиями загрязнения пылью атмосферного воздуха и снежного покрова на стационарных постах Росгидромета ряда крупных городов юга Западной Сибири, включая Новосибирск, Кемерово, Барнаул, Томск, установлены коэффициенты пересчёта уровней загрязнения. Это даёт возможность по результатам изучения снежного покрова проводить ориентировочную гигиеническую оценку загрязнения воздушного бассейна города [4].

Геохимическими исследованиями выявлены количественные закономерности выпадений пыли в окрестностях промышленных площадок, что фиксируется в виде аномалий в снежном покрове, депонирующем загрязнение, и легкодоступном для изучения по любой заранее заданной сети точек отбора проб [2]. Учёт же дополнительной вполне доступной информации о параметрах источников, характеристиках дисперсного состава выбросов пыли, текущих метеорологических условиях позволяет оптимизировать систему точек отбора проб снега, повысить точность восстановления полей выпадений, оценить по данным внешнего мониторинга суммарные выбросы пыли в атмосферу [5].

Численная реконструкция поля длительных выпадений пыли. При расчете средней концентрации в приземном слое атмосферы определяющее значение имеют часто встречающиеся метеорологические условия. К ним относятся так называемые нормальные метеоусловия, для которых применима степенная аппроксимация скорости ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена [1]. Использование этих аппроксимаций, асимптотик полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии и свойств статистических характеристик распределения скорости ветра и вертикального турбулентного обмена в приземном слое атмосферы позволяет выразить плотность выпадений полидисперсной примеси за длительный промежуток

времени в виде следующей регрессионной зависимости [5]

$$\bar{\sigma}(r, \varphi, \bar{\theta}) = \theta_1 G(r, \theta_2, \theta_3) P(\varphi + 180^\circ), \quad (1)$$

$$G(r, \theta_2, \theta_3) = \frac{1}{r^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{r}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{\theta_2} \exp(-\theta_3 \omega) \left(\frac{c}{r}\right)^\omega}{\Gamma(1 + \omega)} d\omega,$$

где r, φ – полярные координаты, $P(\varphi)$ – приземная роза ветров; $\Gamma(m)$ – гамма-функция Эйлера, c – константа, зависящая от высоты источника, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – неизвестные параметры, определяемые по данным наблюдений.

Замечание 1. Для существенно неоднородной по дисперсному составу пыли основные её выпадения в ближней зоне от источника будут представлены крупными фракциями частиц со скоростями оседания в атмосфере, достигающих нескольких десятков см/с. В этом случае, используя кинематическую схему переноса частиц в атмосфере, выпадение пыли в ближней зоне можно описать более простой зависимостью

$$\bar{\sigma}(r, \varphi, \bar{s}) = s_1 r^{s_2} \exp\left(-\frac{s_3}{r}\right) P(\varphi + 180^\circ), \quad (2)$$

где неизвестные параметры s_1, s_2, s_3 также оцениваются по данным наблюдений.

Параметр s_1 линейно зависит от интенсивности источника, а параметры s_2, s_3 – от характеристик дисперсного состава пыли.

Повторяемость направлений ветра $P(\varphi)$ обычно задаётся в табличном виде по 8 или 16 румбам. Для её непрерывного описания удобно использовать между румбами следующую линейную интерполяцию по углу φ .

$$P_i(\varphi) = p_i + \frac{p_{i+1} - p_i}{\pi/N} \left(\varphi - \frac{\pi i}{N} \right), \quad (3)$$

$$\varphi \in \left[\frac{\pi i}{N}, \frac{\pi(i+1)}{N} \right],$$

где p_i – повторяемость i -го направления ветра, $i = 1, \dots, N$.

Замечание 2. При отсутствии надёжной информации о розе ветров для данной точки местности или переменной интенсивности эмиссии источника пыли восстановление поля плотности осадка можно выполнить поэтапно. При фиксированном φ_0 , т.е. на радиально расположенном маршруте пробоотбора, провести оценивание величин $\bar{\theta}_1(\varphi_0) \equiv \theta_1 P(\varphi_0 + 180^\circ), \theta_2, \theta_3$. Затем, учитывая, что параметры θ_2, θ_3 практически от φ не зависят, провести оценивание величины $\bar{\theta}_1(\varphi)$ для других углов φ .

Метод оценивания суммарных выпадений пыли в окрестностях источника. Одной из основных характеристик источника является выброс из него примеси за определённый промежуток времени. Если поле выпадений пыли количественно восстановлено по данным наблюдений, например, с использованием зависимости (1), то возникает возможность оценить суммарный выброс пыли на основе следующего соотношения

$$Q_{\text{сум}} = \iint_S \bar{\sigma}(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (4)$$

где S – территория вокруг источника, на которую происходит выпадение пыли, $\bar{\sigma}(\xi, \eta)$ – плотность выпадений пыли, представленная в декартовых координатах.

Если область S является кольцеобразной относительно источника, то с учётом (1) и замечания 2 соотношение (4) представляется в более удобном виде

$$Q_{\text{сум}} = \int_0^{2\pi} \bar{\theta}_1(\varphi) d\varphi \cdot \int_{R_1}^{R_2} G(r, \theta_2, \theta_3) r dr. \quad (5)$$

Соотношение (5) позволяет существенно упростить вычисление суммарных выпадений пыли в различных областях и оптимизировать количество точек отбора проб. Например, с учётом интерполяционной формулы (3) в случае 8-румбового задания частей света и без использования розы ветров, оценку величины $Q_{\text{сум}}$ можно провести по 10 опорным точкам наблюдений.

Исследование пылевого загрязнения снежного покрова от Искитимского цементного завода Новосибирской области. Производство цемента сопровождается выбросами в атмосферу как твердых, так и газообразных загрязняющих веществ, имеющих значительный риск для здоровья населения [3]. В составе выбросов в основном присутствует неорганическая пыль, окислы азота, серы, углерода, бенз(а)пирен.

Город Искитим расположен в юго-восточной части Новосибирской области в 55 км от областного центра – города Новосибирска. Искитимский цементный завод находится в северной части города на одной промплощадке. С северной и восточной сторон промплощадка предприятия примыкает к р. Бердь. С южной и западной сторон от промплощадки расположен жилой сектор. Ближайшее расстояние до жилых кварталов составляет 30–50 м.

Материалы и методы. Объектами исследования служили выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников ОАО «Искитимцемент», снежный покров на территории г. Искитим и за его пределами. Материалами исследований являлись отчёты ОАО «Искитимцемент» о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ стационарными источниками в период 2012 и 2013 г., результаты визуального обследования и физико-химического анализа состава проб снеговой воды. Маршруты отбора проб располагались по 8 румбам относительно основных источников выброса неорганической пыли – двух близко расположенных 80-метровых труб. Точки наблюдений находились в диапазоне расстояний от 0,4 до 3 км.

Отбор проб снега проводили с помощью пластмассовой трубы диаметром 10 см. В каждой точке отбора осуществлялась выемка от 2 до 10 кернов снега. Пробы снега таяли при комнатной температуре, талая вода фильтровалась через фильтр (синяя лента), измерялось значение pH . В пределах 1,5 км от основных источников величины pH варьировались от 9 до 12. Исследова-

ние химического состава снеговой воды и выделенного осадка проводили в аккредитованных лабораториях Новосибирского НИИ гигиены, Института неорганической химии СО РАН. Статистическая обработка и математическое моделирование выполнялись в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Результаты и их обсуждение. Отбор проб снега был проведён по 8 радиальным

маршрутам и более чем в 40 точках местности. Это позволило осуществить детальный численный анализ процессов выпадений пыли от основных источников предприятия, установить количественные закономерности содержания осадка в снеге на различных направлениях выноса. На рис. 1–3 представлены результаты численного восстановления по данным наблюдений поля плотности осадка неорганической пыли.

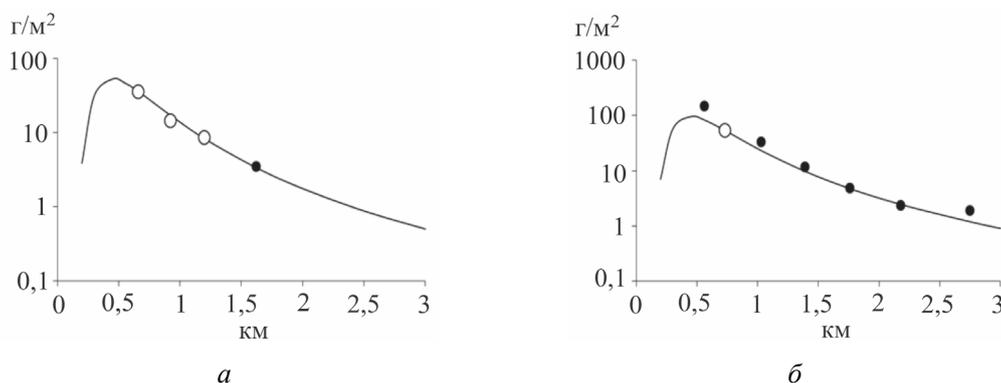


Рис. 1. Восстановленные на основе зависимости (1) выпадения неорганической пыли в северо-восточном (а) и северном (б) направлении от цементного завода; ○, ● – опорные и контрольные точки измерений

Из анализа рис. 1 вытекает, что согласие расчётов с данными наблюдений в контрольных точках вполне удовлетворительное. Максимум выпадений неорганической пыли находится примерно в 450 метрах от основных источников, что указывает на

достаточно разнородный дисперсный состав оседающих частиц. Вынос пыли в зимнее время в северо-западном направлении является преобладающим и обусловлен, по-видимому, орографическими особенностями местности.

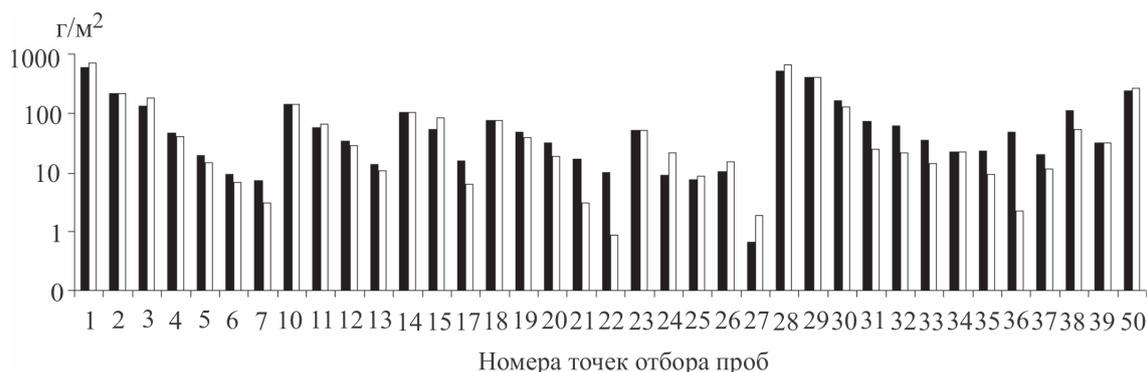


Рис. 2. Измеренные (■) и восстановленные (□) на основе зависимости (1) выпадения неорганической пыли ($г/м^2$) в точках отбора проб снега

Полученные закономерности за рассматриваемый зимний период позволили определить величину суммарного выпадения неорганической пыли от выбросов в атмосферу на разном расстоянии от цементного

производства. Суммарное содержание неорганической пыли в снеге на территории в радиусе 1 км от основных источников выброса ОАО «Искитимцемент» составило 626 тонн, в радиусе 2 км – 875 тонн,

в радиусе 3 км – 942 тонны, в радиусе 4 км – 969 тонн. Полученные оценки суммарных выпадений существенно расходятся с данными инвентаризации валовых выбросов пыли цементным заводом, проведённой в 2012 г. Согласно этим данным, валовый выброс пыли должен был составить в зимнем сезоне 2012/2013 гг. порядка 100 тонн.

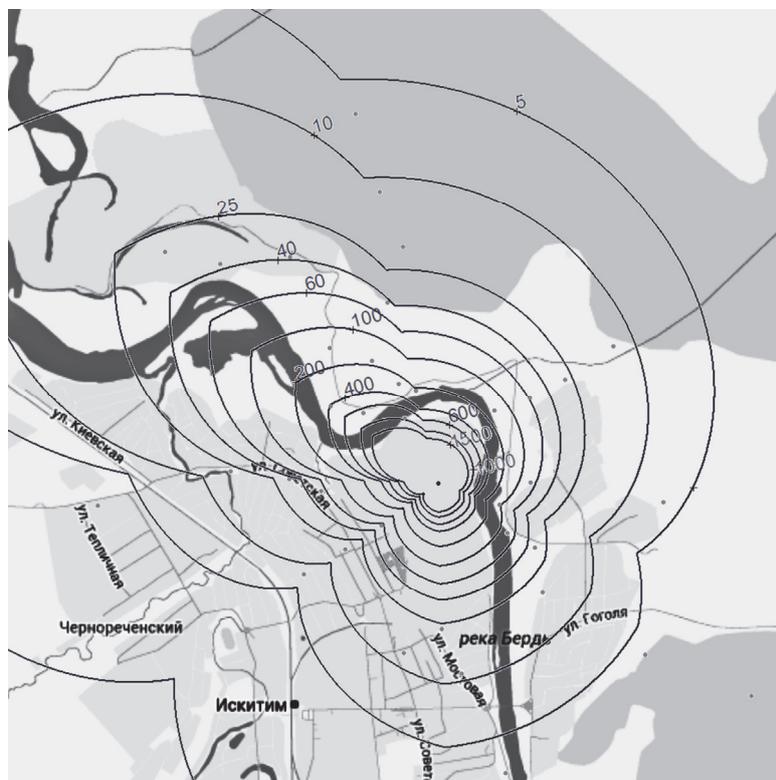


Рис. 3. Восстановленное поле плотности выпадений неорганической пыли ($\text{г}/\text{м}^2$) в окрестностях Искитимского цементного завода по данным маршрутных снегосъёмов в конце зимнего сезона 2012/2013 гг.

Выводы. Таким образом, полученное несоответствие расчетных данных инвентаризации с фактическими результатами натурных исследований свидетельствует о необходимости установления удельных значений выбросов неорганической пыли для каждого цементного производства.

Список литературы

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
2. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 182 с.
3. Методические подходы разработки управленческих решений по снижению риска здоровью населения от загрязнения окружающей среды / В.В. Турбинский, А.С. Крига, Ю.В. Ерофеев, И.И. Новикова, В.Н. Михеев // Здоровье населения и среда обитания. – 2010. – № 7. – С. 18–21.
4. Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Девятова А.Ю. Сравнительная оценка состояния длительного загрязнения атмосферы и снегового покрова г. Новосибирска на сети стационарных постов Гидрометеослужбы // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23, № 6. – С. 499–504.
5. Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Морозов С.В. Экспериментальные исследования и численный анализ процессов загрязнения снегового покрова в окрестностях крупной автомагистрали г. Новосибирска // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – Т. 18, № 1. – С. 63–70.

References

1. Berl'jand M.E. Sovremennye problemy atmosfernoj diffuzii i zagrjaznenija atmosfery [Modern problems of atmospheric diffusion and air pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975. 448 p.
2. Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman Sh.D. Monitoring zagrjaznenija snezhnogo pokrova [Monitoring of snow cover pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 182 p.
3. Turbinskij V.V., Kriga A.S., Erofeev Ju.V., Novikova I.I., Miheev V.N. Metodicheskie podhody razrabotki upravlencheskih reshenij po snizheniju riska zdorov'ju naselenija ot zagrjaznenija okruzhajushhej sredy [Methodological approaches to the development of management decisions to reduce the risk to human health from environmental pollution]. *Zdorov'e naselenija i sreda obitaniya*, 2010, no. 7, pp. 18–21.
4. Raputa V.F., Kokovkin V.V., Devjatova A.Ju. Sravnitel'naja ocenka sostojanija dlitel'nogo zagrjaznenija atmosfery i snegovogo pokrova g. Novosibirsk na seti stacionarnyh postov Gidrometeoslužby [Comparative assessment of long-term contamination of atmosphere and snow cover in Novosibirsk on the network of Hydrometeorological stationary posts]. *Optika atmosfery i okeana*, 2010, vol. 23, no. 6, pp. 499–504.
5. Raputa V.F., Kokovkin V.V., Morozov S.V. Jeksperimental'nye issledovanija i chislennyj analiz processov zagrjaznenija snegovogo pokrova v okrestnostjah krupnoj avtomagistrali g. Novosibirsk [Experimental research and numerical analysis of processes of snow cover pollution in the vicinity of the major highway in Novosibirsk]. *Himija v interesah ustojchivogo razvitiya*, 2010, vol. 18, no. 1, pp. 63–70.

ASSESSMENT OF AIR POLLUTION BY DUST ACCORDING TO DATA OBTAINED FROM SNOW SURVEY ON THE BASE OF FALL AREAS RECONSTRUCTION*

A.F. Sherbatov¹, V.F. Raputa², V.V. Turbinskiy³, T.V. Yaroslavceva³

¹Administration of the Federal Supervision Agency for Customer Protection and Human Welfare for Novosibirsk region, Russian Federation, Novosibirsk, Chelyuskintsev Str., 7a, 630132

²Institute of Computing Mathematics and Mathematical Geophysics of Siberian department of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Av., 6, 630090

³Federal Budget Institution of Science “Novosibirsk Scientific Research Institute of Hygiene” of the Federal Supervision Agency for Customer Protection and Human Welfare, Russian Federation, Novosibirsk, Krasny Av., 52, 630091

The article provides the results of field survey of snow pollution by non-organic dust near cement factory in the winter season 2012/13. On the basis of computational reconstruction of fall areas the existence of stable quantitative regularities of dust content in the snowpack in the radial direction relative to the main source has been shown. The total area of dust falling has been restored and the assessment of the dust emission into atmosphere in the observed winter season has been performed.

Key words: pollution, snowpack, cement dust, computational simulation, reconstruction.

© Sherbatov A.F., Raputa V.F., Turbinskiy V.V., Yaroslavceva T.V., 2014

Shcherbatov Aleksandr Fedorovich – Head of Administration of the Federal Supervision Agency for Customer Protection and Human Welfare for Novosibirsk region (e-mail: upravlenie@54.rospotrebnadzor.ru, 8 (383) 220-26-78).

Raputa Vladimir Fedotovitch – Doctor of physical and mathematical sciences, leading research associate of laboratory for mathematical modeling of processes in atmosphere and hydrosphere of Institute of Computing Mathematics and Mathematical Geophysics of Siberian department of the Russian Academy of Sciences (e-mail: raputa@sscc.ru, 8 (383) 33-06-151).

Turbinsky Viktor Vladislavovich – MD, associate professor, director of Federal Budget Institution of Science “Novosibirsk Scientific Research Institute of Hygiene” of the Federal Supervision Agency for Customer Protection and Human Welfare (e-mail: rector@ngmu.ru, tel.: 8 (383) 222-32-04).

Yaroslavtseva Tatyana Vladimirovna – Candidate of chemical sciences (e-mail: ngi@cn.ru, tel.: 8 (383) 343-34-01).