

Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2016, 9(7), 950-959

~ ~ ~

УДК 528.8:622

## Monitoring of Aerosol Pollution of Snow Cover with Ground Based Observation Data and Satellite Information

Anatoly A. Lezhenin<sup>\*a</sup>,  
Tatyana V. Yaroslavtseva<sup>b</sup> and Vladimir F. Raputa<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Computational Mathematics  
and Mathematical Geophysics SB RAS  
6 Akademika Lavrenteva, Novosibirsk, 630090, Russia*

<sup>b</sup>*Novosibirsk Scientific Research Institute of Hygiene  
Rospotrebnadzora  
7 Parhomenko, Novosibirsk, 630108, Russia*

Received 11.02.2016, received in revised form 13.03.2016, accepted 18.03.2016

---

*With data on the monitoring of snow cover pollution and satellite images an analysis of the sedimentation of polluted substances from high-altitude chimneys of the Iskitimsky cement plant is carried out. On the basis of the solution of a semi-empirical equation for the transfer and diffusion of substance in the atmosphere, a numerical reconstruction of the dust pollution field in the vicinity of the enterprise is made. A possibility of using satellite information to assess the areas of pollution which out snow precipitation formed in time intervals from several days to several weeks is shown.*

*Keywords: atmosphere, aerosol, pollution of snow cover, numerical modeling, satellite images.*

---

Citation: Lezhenin A.A., Yaroslavtseva T.V., Raputa V.F. Monitoring of aerosol pollution of snow cover with ground based observation data and satellite information, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(7), 950-959. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-950-959.

---

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

\* Corresponding author E-mail address: [lezhenin@ommfao.sccc.ru](mailto:lezhenin@ommfao.sccc.ru)

## **Мониторинг аэрозольного загрязнения снежного покрова на основе наземной и спутниковой информации**

**А.А. Леженин<sup>а</sup>, Т.В. Ярославцева<sup>б</sup>, В.Ф. Рапуга<sup>а</sup>**

*<sup>а</sup>Институт вычислительной математики  
и математической геофизики СО РАН*

*Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6*

*<sup>б</sup>Новосибирский институт гигиены Роспотребнадзора  
Россия, 630108, Новосибирск, ул. Пархоменко, 7*

---

*С использованием данных мониторинга загрязнения снежного покрова и спутниковых снимков проведен анализ полей выпадения взвешенных веществ от высотных труб Искитимского цементного завода. На основе решения полуэмпирического уравнения переноса и диффузии примесей в атмосфере выполнена численная реконструкция пылевого загрязнения окрестностей предприятия. Для периодов отсутствия снегопадов показана возможность использования спутниковой информации при оценке ореолов загрязнений, формирующихся в интервалах времени от нескольких дней до нескольких недель.*

*Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, загрязнение снежного покрова, численное моделирование, спутниковые наблюдения.*

---

### **Введение**

Для описания процессов переноса атмосферных загрязнителей широко используются методы математического моделирования [1-3]. При наличии необходимой входной информации применение этих методов является достаточно эффективным. Однако в реальных условиях всегда существует проблема неполноты входных данных. В этом случае моделирование процессов распространения примесей существенно усложняется, требует использования разносторонней информации о процессах загрязнения и проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Информация, получаемая с искусственных спутников Земли, позволяет визуализировать загрязнения атмосферы, растительного и снежного покрова вокруг городов и крупных промышленных предприятий [4-7]. Снежный покров на спутниковых снимках служит фоном, на котором можно наблюдать постепенное развитие загрязнения территорий. Этот эффект наглядно проявляется в периоды времени, когда отсутствуют выпадения снега, а также во время снеготаяния в конце зимнего сезона [7-10]. Следует отметить, что инструментальные исследования загрязнения атмосферного воздуха требуют значительных материальных затрат и их проведение, как правило, носит эпизодический характер. Более экономичные методы – использование природных планшетов (почвенный, растительный и снежный покровы), а также данных дистанционного зондирования Земли.

### **Материалы и методы**

В зимние сезоны 2012/13 и 2013/14 гг. проводились мониторинговые исследования пылевого загрязнения снежного покрова в окрестностях цементного завода, расположенного в

г. Искитим [11]. Город находится в юго-восточной части Новосибирской области в 55 км от областного центра – г. Новосибирска. С севера и востока к промплощадке предприятия примыкает р. Бердь. Основными источниками выброса неорганической пыли в атмосферу являются две близко расположенные 80-метровые трубы с диаметрами 6 м.

Объектами исследования служили выбросы взвешенных 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 2012–2013 гг., результаты визуальных и спутниковых наблюдений и физико-химического анализа состава проб снеговой воды.

Маршруты отбора проб располагались по восьми румбам относительно основных источников выброса неорганической пыли. Точки наблюдений находились в пределах расстояний от 0,4 до 3 км. Отбор проб был произведён более чем в 40 точках. Это позволило провести детальный численный анализ процессов выпадений пыли от основных источников предприятия, установить количественные закономерности содержания осадка в снеге на различных направлениях выноса. На рис. 1 представлена схема отбора проб снега, расположение основных источников и метеостанции г. Искитима.





Рис. 1. Схема отбора проб снега:  – основной источник выброса пыли;  – положение метеостанции г. Искитима

Таблица 1. Повторяемость направлений ветра на метеорологической станции г. Искитим в зимние периоды времени

Направление ветра	С	СЗ	З	ЮЗ	Ю	ЮВ	В	СВ	штиль
Повторяемость ветра в зимнем сезоне 2012/13 г., %	1	5	16	30	29	7	2	1	9
Повторяемость ветра с 30.01.14 по 7.02.14, %	0	3	14	62	10	0	0	2	9

Предварительный анализ данных измерений показал сильное защелачивание снеготалых вод. В пределах до 1,5 км от основных источников выбросов величина рН варьировалась от 9 до 12 ед. Преобладающие выпадения пыли произошли в северо-западном, северном и северо-восточном направлениях от цементного завода.

Для проведения оценок распространения пылевого загрязнения снежного покрова в окрестностях цементного завода полезно использовать информацию о повторяемости направлений ветра в различные периоды времени. В табл. 1 приведены данные метеостанции о повторяемости направлений ветра за зимний сезон 2012/13 г. и за период времени с 30 января по 7 февраля 2014 г.

Промежутки времени, когда отсутствуют снегопады, удобны для анализа спутниковых наблюдений. С 30 января по 7 февраля 2014 г. метеостанция зафиксировала отсутствие выпадений снега. При этом в более 80 % случаев преобладали слабые ветры (1–2 м/с). Штилевые условия наблюдались в 9 % случаев.

### Модель реконструкции

При расчете средней концентрации в приземном слое атмосферы определяющее значение имеют часто встречающиеся метеорологические условия. К ним относятся так называемые нормальные метеоусловия, для которых используется степенная аппроксимация скорости ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена [3]. В этом случае использование асимптотик полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии и статистических свойств 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 [12, 13]:

$$\bar{q}(r, \varphi) = \frac{\theta_1}{r^{1.5}} P(\varphi + 180^\circ) \exp\left(-\frac{c}{r}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{-\theta_2} \exp(-\theta_3 \omega)}{\Gamma(1 + \omega)} \left(\frac{c}{r}\right)^\omega d\omega, \quad (1)$$

где  $r, \varphi$  – полярные координаты;  $P(\varphi)$  – приземная роза ветров;  $\Gamma(m)$  – гамма-функция Эйлера;  $c$  определяется высотой источника; параметры  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  неотрицательны.

Исследование свойств функции (1) показывает, что она в интервале значений  $r \in (0, \infty)$  достигает максимума в некоторой точке  $r_0$ , монотонно возрастает при  $r \in (0, r_0)$ , соответственно монотонно убывает в интервале значений  $r \in (r_0, \infty)$  и стремится к нулю при  $r \rightarrow 0, r \rightarrow \infty$ . Оценка неизвестных параметров  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , входящих в соотношение (1), проводится методом

наименьших квадратов с использованием данных измерений плотности выпадений взвешенных веществ в точках местности. Следует также отметить, что величина  $1,5 \cdot c$  соответствует величине расстояния, на котором достигается максимальная приземная концентрация слабооседающей примеси [3].

**Замечание 1.** Параметры  $\theta_2, \theta_3$  зависят от характеристик дисперсного состава аэрозольной примеси и метеорологических условий. Данное обстоятельство позволяет существенно снизить количество опорных точек измерений при проведении оценивания выпадений примеси по другим радиальным относительно источника направлениям. В этом случае достаточно лишь провести переоценку параметра  $\theta_1$ , который, согласно [12], пропорционален мощности источника и изменение которого зависит от временного интервала повторяемости ветра в заданном направлении.

### Результаты

В табл. 2 приведены результаты экспериментальных исследований выпадений взвешенных веществ в окрестностях цементного завода. Совместный анализ рис. 1 и данных табл. 2 показывает, что по всем исследованным направлениям выноса с увеличением расстояния от источника происходит монотонное убывание выпадений пыли.

На основе модели (1) проведена численная реконструкция поля выпадений. Показано существование устойчивых количественных закономерностей содержания пыли в снежном покрове по радиальным относительно основного источника направлениям. Восстановлено сум-

Таблица 2. Выпадения пыли ( $\text{г}/\text{м}^2$ ) в окрестностях Искитимского цементного завода в зимнем сезоне 2012/13 г.

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	10
Расстояние от источника, км	0.56	0.73	1.03	1.39	1.76	2.18	2.75	0.69
Плотность выпадений пыли, $\text{г}/\text{м}^2$	604.2	214.4	133.9	46.8	20.0	9.6	7.4	143.6
Номер точки	11	12	13	14	15	17	18	19
Расстояние от источника, км	0.92	1.2	1.62	0.46	0.66	1.6	0.58	0.79
Плотность выпадений пыли, $\text{г}/\text{м}^2$	58.7	34.1	14.1	103.4	54.1	15.9	76.6	49.4
Номер точки	20	21	22	23	24	25	26	27
Расстояние от источника, км	1.04	1.89	2.66	0.48	0.78	1.12	1.49	2.41
Плотность выпадений пыли, $\text{г}/\text{м}^2$	32.6	17.3	10.2	51.9	9.3	7.7	10.6	0.7
Номер точки	28	29	30	31	32	33	34	35
Расстояние от источника, км	0.76	0.97	1.28	1.97	2.23	2.57	0.99	1.34
Плотность выпадений пыли, $\text{г}/\text{м}^2$	521.0	408.6	162.7	74.4	63.3	35.7	22.7	23.2
Номер точки	36	37	38	39	50			
Расстояние от источника, км	2.09	1.2	0.83	1.05	0.81			
Плотность выпадений пыли, $\text{г}/\text{м}^2$	48.7	20.2	114.1	32.5	242.4			

марное поле выпадений пыли и проведена оценка выбросов в атмосферу в рассматриваемом зимнем сезоне. Результаты численного моделирования представлены на рис. 2.

Оценивание параметров регрессии (1) проводилось по данным измерений твёрдого осадка примеси в снеге в точках северо-восточного направления с номерами 10, 11, 12. Было рассмотрено два варианта восстановления поля выпадений. В первом варианте использовались в соответствии с замечанием 1 данные измерений выпадений примеси на всех маршрутах пробоотбора. Во втором варианте была использована информация о зимней розе ветров и результаты оценивания параметров  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ .

На рис. 3 приведено сопоставление в точках отбора проб снега данных экспериментальных исследований с результатами восстановления по модели (1) плотности аэрозольных выпадений примесей. Анализ рис. 3 показывает, что результаты расчетов по первому варианту вполне

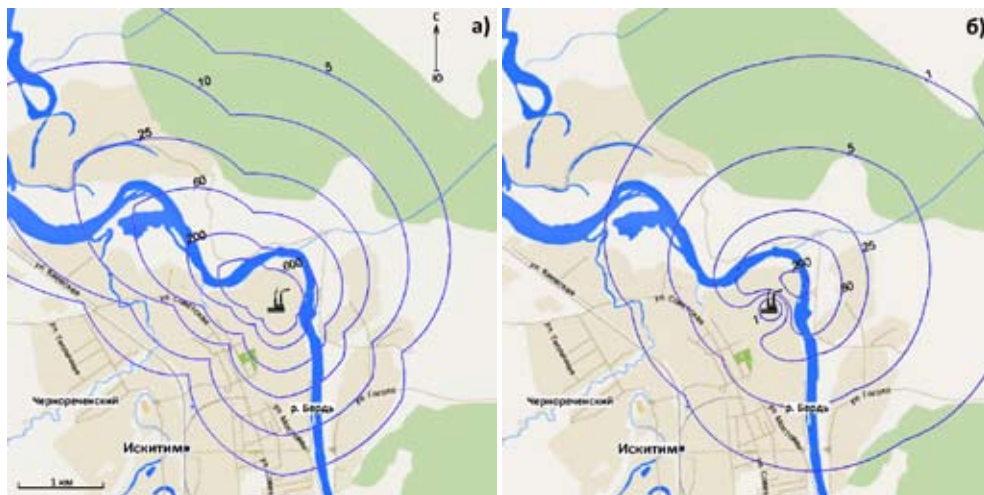


Рис. 2. Восстановленные на основе модели (1) поля плотности выпадений пыли ( $\text{г}/\text{м}^2$ ) по данным маршрутной снегосъёмки (а) и с использованием зимней розы ветров (б)

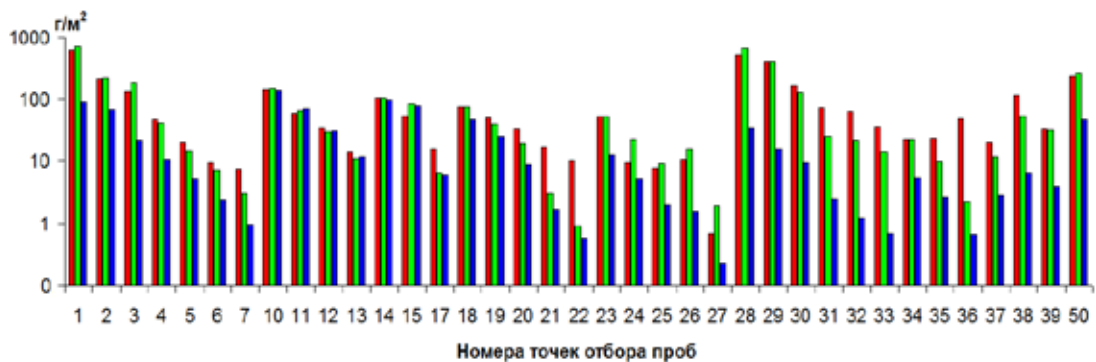


Рис. 3. Измеренные (■) и восстановленные на основе зависимости (1) выпадения пыли ( $\text{г}/\text{м}^2$ ) в точках отбора проб снега: (■) – расчёт с использованием данных наблюдений со всех маршрутов отбора проб; (■) – расчёт с использованием наблюдений в северо-восточном направлении и зимней розы ветров 2012/13 г.

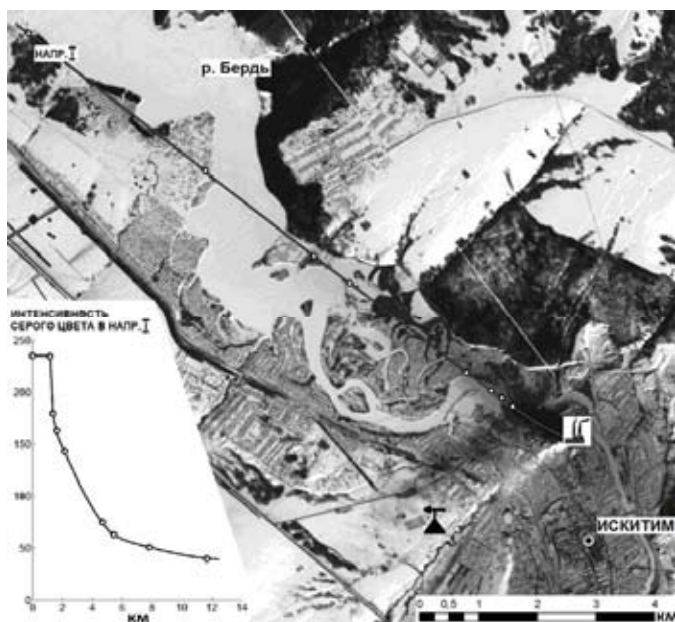


Рис. 4. Спутниковый снимок окрестностей Искитимского цементного завода от 7 февраля 2014 г. В левом нижнем углу – интенсивность изменения оттенков серого цвета в северо-западном направлении (направление I) от основных источников пылевых выбросов

удовлетворительно согласуются с данными наблюдений, в расчетах же по второму варианту расхождения весьма значительны.

Привлечение спутниковых наблюдений позволяет визуализировать пространственную картину поля выпадения пыли на снежный покров. На рис. 4 представлен снимок окрестностей Искитимского цементного завода с ИСЗ «Landsat-8» за 7 февраля 2014 г., взятый с сайта Сибирского центра ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА» (<http://www.rcpod.ru>).

На снимке отчетливо видна область интенсивного загрязнения снежного покрова в северо-западном направлении от источника. Метеорологическая станция, расположенная на расстоянии около 2 км от промышленной площадки предприятия, не фиксировала интенсивного выпадения снега в период с 30 января по 7 февраля 2014 г. Следовательно, основной шлейф загрязнения, видимый на космическом снимке, сформировался за этот период времени. Из табл. 1 следует, что в данный промежуток времени доминировали ветры западного (14 %), юго-западного (62 %) и южного (10 %) направлений.

На рис. 4 явно прослеживается северо-западная ориентация пылевого выноса. Интенсивность изменения яркостных характеристик снежного покрова в этом направлении монотонно уменьшается с увеличением расстояния от источника загрязнения, что подтверждается также результатами наземного мониторинга.

### Обсуждение результатов

Из анализа данных экспериментальных исследований и результатов моделирования, приведенных на рис. 2а и в табл. 1, следует, что основные выпадения пыли от высотных труб Иски-

тимского цементного завода произошли в направлении на северо-запад, вдоль долины р. Бердь. Исходя же из режима ветра, основные выносы пыли согласно рис. 2б следовало бы ожидать в северо-восточном направлении.

С другой стороны, спутниковые снимки загрязнения снежного покрова также подтверждают, что основные выпадения пыли наблюдаются в северо-западном направлении, хотя измерения на метеостанции г. Искитима фиксируют преобладание юго-западных и южных ветров. Возникшее противоречие объясняется орографическими особенностями местности, наличием возвышенных форм рельефа в правобережье р. Бердь и часто наблюдаемой устойчивой температурной стратификацией в нижней атмосфере. Конфигурация рельефа в данном случае оказывает заметное влияние на процессы распространения газовых и аэрозольных примесей в приземном слое атмосферы.

Отметим, что в условиях сложного рельефа данные измерений с близлежащей метеостанции могут не отражать реальное поле ветра в районе источника выбросов. Поэтому формальное использование общепринятой методики расчета полей концентраций примесей [14] может привести к ошибочным результатам и выводам. В связи с этим вытекает необходимость проведения также и мониторинговых исследований процессов техногенного загрязнения территорий.

### Заключение

При традиционном подходе последовательные спутниковые снимки в период интенсивного снеготаяния позволяют выявить зоны загрязнений от промышленных предприятий за зимний сезон [7, 9]. Такой подход существенно ограничивает возможности использования космической информации, получаемой в течение всего зимнего периода. На наш взгляд, для более полного применения космической информации целесообразно привлекать данные о текущих метеорологических условиях. Тогда в периоды отсутствия снегопадов можно оценивать зоны промежуточного техногенного загрязнения. В частности, на территориях, находящихся под влиянием сибирского антициклона, в зимнее время при отсутствии облачности с помощью спутниковых снимков можно отслеживать ореолы загрязнений, формирующихся в периоды времени от нескольких дней до нескольких недель в окрестностях промышленных предприятий.

### Список литературы

- [1] *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей*. Под ред. Ф.Т.М. Ньистада и Х. ван Допа. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 351 с. [*Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling*. Ed. by F.T.M. Nieuwstad and H. Van Dop. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 351 p. (in Russian)]
- [2] Алоян А.Е. *Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере*. М.: Наука, 2008. 415 с. [*Aloyan A.E. Modeling of dynamics and kinetics of gas impurity and aerosols in the atmosphere*. Moscow, Nauka, 2008, 415 p. (in Russian)]
- [3] Берлянд М.Е. *Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы*. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с. [*Berljand M.E. Modern problems of atmospheric diffusion and pollution of the atmosphere*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 448 p. (in Russian)]



[4] Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Стальная М.В. Использование данных ИСЗ LANDSAT для определения концентрации загрязнителей в шлейфах от продувки газовых скважин на основании модели источника. *Исследование Земли из космоса*, 2014, 2, 55-66 [Balter B.M., Balter D.B., Egorov V.V., Stalnaya M.V. Fitting the Emission Model and Meteorology to Landsat Data on Pollutant Plumes from Gas Well Pumping. *Research of Earth from space*, 2014, 2, 55-66 (in Russian)]

[5] Курбанов Э.А., Воробьёв О.Н., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А. Оценка загрязнения древостоев отходами силикатного производства по снимку RapidEye. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2013, 10(2), 88-97 [Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Lezhnin S.A., Polevshikova Y.A. Estimation of forest contamination by the waste of silicate production on RapidEye image. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, 10(2), 88-97 (in Russian)]

[6] Василевич М.И., Щанов В.М., Василевич Р.С. Применение спутниковых методов исследований при оценке загрязнения снежного покрова вокруг промышленных предприятий в тундровой зоне. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2015, 12(2), 50-60 [Vasilevich M.I., Shchanov V.M., Vasilevich R.S. Application of satellite methods to assess snow cover pollution around industrial enterprises in the tundra zone. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, 12(2), 50-60 (in Russian)]

[7] Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения в сфере влияния городов и дорог. *Метеорология и гидрология*, 2013, 3, 94-106 [Prokacheva V.G., Usachev V.F. Snow cover as an indicator of cumulative anthropogenic pollution induced by cities and roads. *Meteorology and Hydrology*, 2013, 3, 94-106 (in Russian)]

[8] Онучин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Трефилова О.В., Данилова И.В. Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района. *Сибирский экологический журнал*, 2014, 6, 1025-1037 [Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trefilova O.V., Danilova I.V. Snow Pollution in the Norilsk Industrial Areal. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2014, 6, 1025-1037 (in Russian)]

[9] Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 182 с. [Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman C.D. *Monitoring zagriyzeniy snezhnogo pokrova*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 182 p. (in Russian)]

[10] Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Обнаружение экологических изменений природной среды по данным спутниковых измерений. *Оптика атмосферы и океана*, 2014, 27(7), 652-656 [Kataev M.Yu., Bekеров A.A. Detection of ecological changes in the natural environment from satellite measurements. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2014, 27(7), 652-656 (in Russian)]

[11] Щербатов А.Ф., Рапута В.Ф., Турбинский В.В., Ярославцева Т.В. Оценка загрязнения атмосферного воздуха пылью по данным снегосъёмки на основе реконструкции полей выпадений. *Анализ риска здоровью*, 2014, 2, 42-47 [Sherbatov A.F., Raputa V.F., Turbinskiy V.V., Yaroslavtseva T.V. Assessment of air pollution by dust according to data obtained from snow survey on the base of fall areas reconstruction. *Health Risk Analysis*, 2014, 2, 42-47 (in Russian)]

[12] Рапута В.Ф. Численная реконструкция радиоактивного загрязнения местности от аварии на радиохимическом заводе в Томске-7. *Оптика атмосферы и океана*, 2012, 25(8), 733-737 [Raputa V.F. Numerical reconstruction of regional radioactive contamination by the

accident at radiochemical plant in Tomsk-7. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2012, 25(8), 733-737 (in Russian)]

[13] 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 атмосферы и океана*, 2014, 27(8), 713-718 [Raputa V.F., Shlychikov V.A., Lezhenin A.A., Romanov A.N., Yaroslavtseva T.V. Numerical analysis of aerosol substance fallout from a high-altitude source. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2014, 27(8), 713-718 (in Russian)]

[14] *Методика расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86*. Под ред. М.Е. Берлянда, Н.К. Гасилиной, Е.Л. Гениховича и др. Л: Гидрометеиздат, 1987, 94 с. [*Metodika rascheta koncentracii v atmosfernom vozduhe vrednih vechestv, sodержachihsiy v vibrosah predpriytii. OND-86*. Ed. by M.E. Berljand, N.K. Gasilinoi and E.L. Genihovicha. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 94 p. (in Russian)]