

## Наземный и спутниковый мониторинг загрязнения снежного покрова в окрестностях цементного завода

В.Ф. Рапута<sup>✉1</sup>, В.В. Коковкин<sup>2</sup>, Р.А. Амикишиева<sup>3\*</sup>

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

<sup>2</sup>Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 3

<sup>3</sup>Сибирский центр ФГБУ НИЦ «Планета»  
630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30

Поступила в редакцию 15.02.2022 г.;

после доработки 16.03.2022 г.;

принята к печати 11.04.2022 г.

Обсуждаются результаты экспериментальных и численных исследований атмосферного загрязнения окрестностей цементного завода, расположенного в г. Искитиме Новосибирской обл. Представлены данные сетевых измерений водородного показателя (рН), содержания ионных компонентов, взвешенных веществ, накопленных в снежном покрове за зимний период 2018/2019 гг. Численная реконструкция полей загрязнения осуществлялась с использованием малопараметрических моделей в приближениях легкой и монодисперсной примесей. Проведен статистический анализ связей содержания примесей в пробах снега со значениями снежного индекса (NDSI), рассчитанного по информации со спутниковых снимков высокого разрешения.

*Ключевые слова:* атмосфера, загрязнение, дистанционное зондирование, снежный индекс, численное моделирование; *atmosphere, pollution, remote probing, snow index, numerical modeling.*

### Введение

Крупными источниками атмосферного загрязнения, связанного с антропогенной деятельностью, являются предприятия по производству стройматериалов (до 8% общего выброса в окружающую среду), в частности портландцемента. Цементная пыль воздействует на все компоненты природной среды [1–3]. Выбросы цементных предприятий также представляют значительный риск для здоровья населения и окружающей среды [4–8]. В составе выбросов в основном присутствуют неорганическая пыль, окислы азота, серы, углерода, бенз(а)пирен.

Для исследования процессов длительного загрязнения широко используются природные планшеты, в частности снежный покров. В условиях Сибири снежный покров – удобный индикатор загрязнения, который создает уникальные возможности эффективного контроля выбросов. Он аккумулирует в себе атмосферные выбросы взвешенных веществ, а пробы, взятые по всей толщине снежного покрова, позволяют получить данные о загрязнении за весь зимний период [9–12].

Необходимый этап исследования атмосферного загрязнения окружающей среды – математическое моделирование [13, 14]. Оно позволяет в рамках

прямых и обратных задач переноса газовых и аэрозольных примесей рассчитать поля концентраций, оценить характеристики источников [15–17].

В работе обсуждаются методы полевых и химико-аналитических исследований аэрозольного загрязнения снежного покрова в зоне влияния атмосферных выбросов промышленного предприятия. Для численного анализа полученных данных мониторинга применяются модели реконструкции полей концентраций от природных источников, асимптотики решений полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. С использованием спутниковой информации изучаются статистические связи между данными наземных и дистанционных наблюдений [18–22].

Цели работы – определение содержания взвешенных веществ, макрокомпонентов в пробах снежного покрова, отобранных в районе цементного завода; выявление функциональных связей между результатами контактных и спутниковых наблюдений; оценка уровня техногенной нагрузки на прилегающие территории.

### 1. Объекты и методы исследования

Объект исследования в настоящей работе – атмосферные выпадения примесей в окрестностях цементного завода (г. Искитим, ОАО «Искитимцемент»). Предприятие расположено в 50 км к югу от Новосибирска в долине р. Бердь [7].

\* Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru); Василий Васильевич Коковкин (basil@niic.nsc.ru); Руслана Александровна Амикишиева (ruslana215w@mail.ru).

Производство цемента основано на технологии, которая включает в себя две ступени: первая — получение клинкера, вторая — доведение клинкера до порошкообразного состояния с добавлением к нему гипса и других составляющих [2]. Основная масса вредных примесей формируются на второй стадии. Отходящая газопылевая смесь поступает в две трубы высотой 80 м, расстояние между которыми — 40 м.

Отбор проб снега в окрестностях завода проводился 2 марта 2019 г. Маршруты отбора проб создавались с учетом зимней розы ветров по нескольким румбам относительно основных источников атмосферных выбросов [23]. Точки наблюдений находились в диапазоне расстояний от 0,5 до 6 км. Пробы снега отбирались с помощью титановой трубы диаметром 10 см.

На рис. 1 представлен оцифрованный снимок окрестностей ОАО «Искитимцемент» от 25 марта 2019 г. с панхроматического канала космического аппарата Landsat-8. Оцифровка проводилась по десяти яркостным градациям, на снимке указано месторасположение точек отбора проб снега относительно высотных труб завода.

Пробы анализировали после доставки в лабораторию. После перевода в жидкое состояние при комнатной температуре их фильтровали для отделения осадка. В фильтрах определяли рН, удельную электропроводность, компоненты ионного состава. Применены следующие химико-аналитические методы: гравиметрия, кислотно-основная титриметрия, капиллярный электрофорез, кондуктометрия, рН-метрия и атомно-абсорбционная спектрометрия в пламенном варианте [24, 25].

В работе наряду с результатами полевых и химико-аналитических исследований загрязнения снежного покрова использовались также спутниковые снимки высокого разрешения с космического аппарата Sentinel-2A, -2B, полученные Сибирским центром ФГБУ НИЦ «Планета» (<http://rscpod.ru>). Снимки обрабатывались двумя способами. В первом случае извлекались данные из панхроматического канала, эквализировалась гистограмма снимка, затем изображение сегментировалось по нескольким яркостным порогам. Эта процедура выявляет структуру полей загрязнения, зафиксированную снежным покровом, позволяет связать численные данные со снимка с наземными измерениями. Наряду с яркостными градациями использовались значения снежного индекса NDSI (Normalized Difference Snow Index) — это один из индексов для детектирования снежного покрова на спутниковом снимке. Индекс NDSI — нормированная разница видимого зеленого канала (0,5–0,6 мкм) и коротковолнового инфракрасного канала (1,5–1,8 мкм) [21, 22]. Именно наличие прибора с коротковолновым инфракрасным диапазоном было ключевым фактором при выборе космических аппаратов для анализа процессов загрязнения снежного покрова.

Численная реконструкция полей концентраций осуществлялась на основе малопараметрических моделей в приближениях легкой и монодисперсной примесей. Поля длительного загрязнения от точечных источников описывались соотношениями (1) и (2) соответственно для случаев легкой и монодисперсной примесей [13, 14, 16]:

$$Q_1(r, \varphi, \theta) = \theta r^{-2} \exp\left(\frac{-2r_m}{r}\right) P(\varphi + 180^\circ), \quad (1)$$

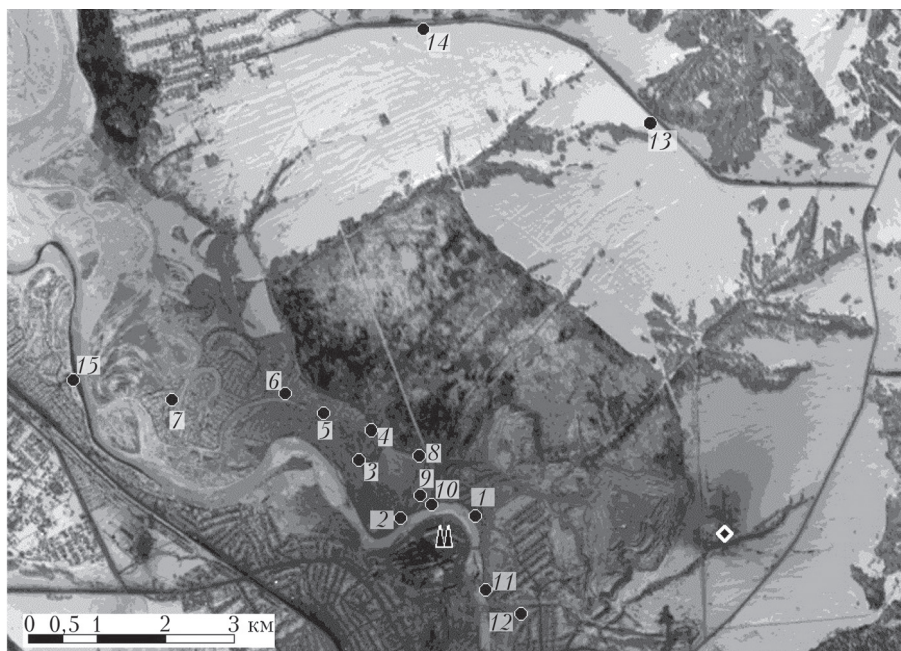


Рис. 1. Спутниковый снимок окрестностей ОАО «Искитимцемент» от 25 марта 2019 г. со спутника Landsat-8. Кружки — точки отбора проб снега в окрестности цементного завода; два треугольника — положение высотных труб; ромбом обозначено расположение цеха производства цемента сухим способом

$$Q_2(r, \varphi, \theta_1, \theta_2) = \theta_1 r^{\theta_2} \exp\left(\frac{-2r_m}{r}\right) P(\varphi + 180^\circ). \quad (2)$$

Здесь  $r$ ,  $\varphi$  – полярная система координат с центром в источнике;  $r_m$  – расстояние от источника, на котором достигается максимальная приземная концентрация примеси;  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – неизвестные параметры, оцениваемые по данным наблюдений;  $P(\varphi)$  – повторяемость направлений ветра.

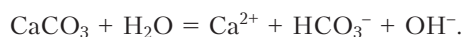
## 2. Результаты и обсуждение

В таблице представлены результаты определения в снеготалых пробах величины осадка, pH раствора, концентраций растворенных солей кальция и калия.

Результаты полевых и химико-аналитических исследований

Проба	Расстояние от трубы, км	Вес пробы, кг	Вес осадка, г	Удельный вес осадка, г/л	pH	Ca <sup>2+</sup> , мг/л	K <sup>+</sup> , мг/л
1	0,64	1,06	0,237	0,224	11,0	12,4	3,0
2	0,67	0,81	0,424	0,523	11,4	13,6	4,1
3	1,32	1,22	0,232	0,283	10,8	12,6	3,0
4	1,65	1,02	0,149	0,190	10,3	12,2	2,7
5	2,11	0,92	0,261	0,146	10,6	11,2	2,4
6	2,49	1,02	0,143	0,140	10,8	9,8	2,1
7	3,39	1,15	0,066	0,057	9,5	6,8	1,2
8	1,18	1,24	0,179	0,144	10,8	10,3	3,1
9	0,80	1,00	0,314	0,314	11,3	11,5	2,8
10	0,67	0,88	0,362	0,411	10,9	7,1	3,4
11	0,46	0,72	0,218	0,303	10,8	6,2	3,2
12	0,93	0,95	0,135	0,142	10,3	9,6	1,6
13	5,24	1,55	0,063	0,041	9,0	7,3	2,2
14	5,75	0,88	0,056	0,063	9,0	6,6	1,0
15	4,44	1,03	0,034	0,033	7,7	5,0	0,7

Анализ таблицы показывает, что вес отобранных проб снега меняется от 0,81 до 1,24 кг. Удельный вес осадка в пробах соответствует достаточно широкому диапазону 0,033–0,523 г/л. Величины pH находятся в щелочной области и варьируются в пределах от 7,7 до 11,4. Высокие значения pH в снеготалых водах объясняются тем, что в состав пылевых выбросов входит как оксид кальция (CaO), так и карбонат кальция (CaCO<sub>3</sub>). Процесс взаимодействия этих компонентов цементной пыли с водой описывается следующими уравнениями реакций:



При больших выбросах цементной пыли происходит значительное защелачивание окружающей среды. Такое воздействие может иметь негативные последствия для наземных и речных экосистем.

С использованием спутниковой информации (рис. 1) и данных таблицы на рис. 2 представлены

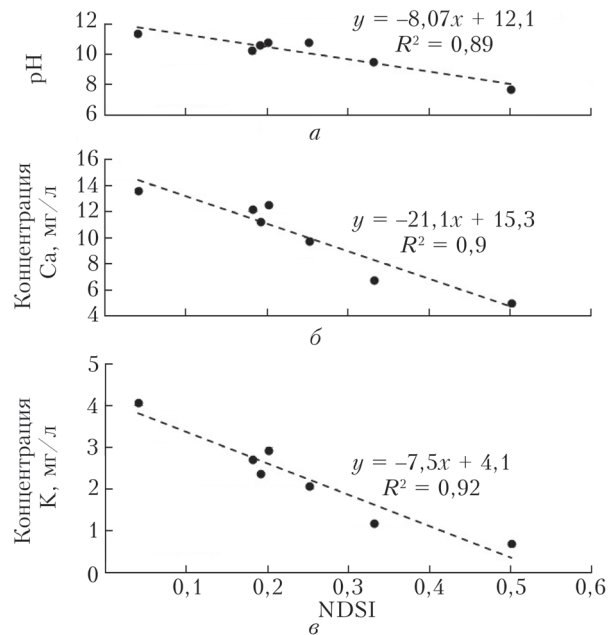


Рис. 2. Линейные корреляционные зависимости между индексом NDSI и данными химического анализа pH (а), концентрациями водорастворенного кальция (б) и калия (в) в северо-западном направлении от высотных труб цементного завода

парные корреляционные связи между индексом NDSI и характеристиками ионного состава в точках пробоотбора.

Рис. 2 отражает достаточно высокий уровень связей между сопоставляемыми величинами, что позволяет использовать установленные зависимости для оценивания исследуемых характеристик водных объектов по данным дистанционных наблюдений снегового покрова в зонах влияния атмосферных выбросов промышленного предприятия.

Предварительный анализ данных измерений, приведенных в таблице, показывает, что для оценивания полей выпадений взвешенных веществ следует применить монодисперсную модель реконструкции (2). Более плавное уменьшение концентраций кальция и калия с удалением от труб указывает на возможность использования для оценивания модели легкой примеси в виде (1). На рис. 3 приведены экспериментальные данные по выпадению на снежный покров взвешенных веществ, растворенных солей кальция и калия и результаты их численного восстановления в северо-западном направлении от основных труб цементного завода.

Из анализа рис. 3 следует, что согласно результатам расчетов с данными наблюдений в контрольных точках вполне удовлетворительное, а из рис. 3, б, в – что максимум выпадений мелких фракций взвешенных веществ находится на расстоянии ~1,4 км. С учетом рис. 3, а это означает, что максимум суммарных выпадений цементной пыли существенно смещен к основным источникам выбросов и указывает на достаточно разнородный

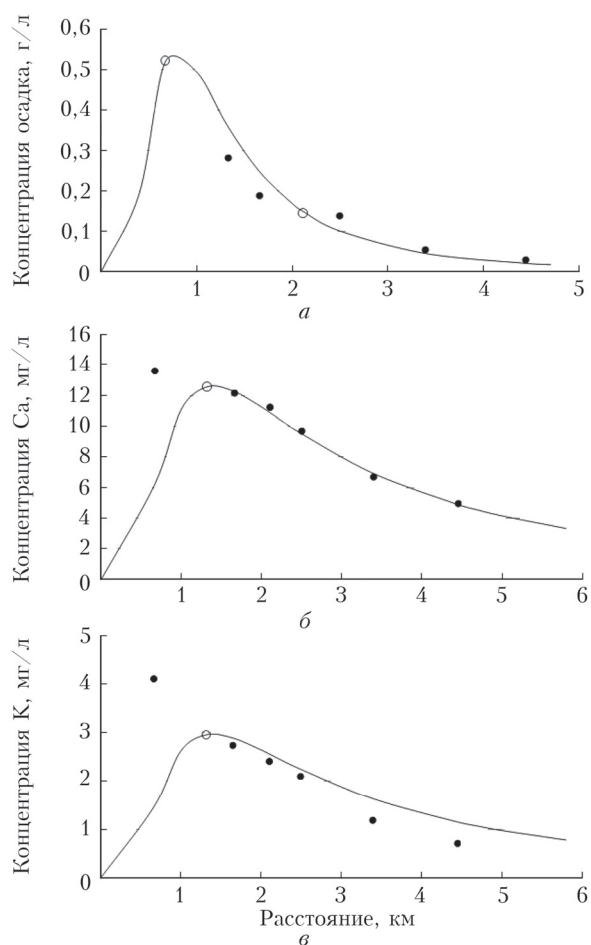


Рис. 3. Измеренные и численно восстановленные концентрации осадка (а), растворенных кальция (б) и калия (в) в пробах снега в северо-западном направлении; белые и черные кружки – опорные и контрольные точки измерений

дисперсный состав оседающих частиц в ближней зоне. Совместный анализ рис. 1 и данных таблицы показывает, что в зимнее время вынос примесей с промплощадки завода в северо-западном направлении является преобладающим и обусловлен в значительной степени орографическими особенностями местности.

### Заключение

Выполнены экспериментальные исследования атмосферного загрязнения взвешенными веществами и ионными компонентами снежного покрова в окрестностях Искитимского цементного завода зимой 2018/2019 гг. Установлены количественные связи между информацией, получаемой со спутников, и данными наземных измерений параметров загрязнения снежного покрова. С привлечением моделей реконструкции в приближениях легкой и монодисперсной примесей численно восстановлены поля выпадений взвешенных веществ, водорастворенных солей кальция и калия от высотных труб цементного завода.

Результаты этих исследований подтвердили эффект значительного защелачивания окружающих

территорий. Наибольшее воздействие поверхностного загрязнения будет проявляться в период активного снеготаяния. Путем контактных и дистанционных наблюдений установлено, что зимой основные выпадения загрязняющих примесей происходят вдоль долины р. Бердь и приводят к снижению качества воды в реке и прилегающих к ней сельхозугодий. В условиях неоднородного рельефа весьма проблематично применение общепринятых методик расчета полей концентраций примесей. Поэтому в бассейнах рек, подверженных влиянию выбросов промышленных предприятий, помимо расчетов целесообразно также проведение дополнительных мониторинговых исследований распространения загрязняющих веществ.

Наличие спутниковых наблюдений заснеженных территорий позволяет повысить эффективность планирования размещения систем наземного мониторинга. Совместное использование данных наземного и спутникового мониторинга снежного покрова существенно расширяет возможности анализа процессов загрязнения и позволяет проводить взаимный контроль результатов, получаемых с этих систем наблюдений в пределах обследованной территории.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках госзадания для ИВМиМГ СО РАН (проект № 0251-2021-0003), при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700315-2).

### Список литературы

1. Van Oss H., Padovani A.C. Cement manufacture and the environment: Part I: Chemistry and technology // J. Ind. Ecol. 2002. V. 6, N 1. P. 89–105.
2. Юдович Б.Э., Дмитриев А.М., Лямин Ю.А., Зубелин С.А. Цементная промышленность и экология. URL: <https://www.allbeton.ru/upload/iblock/ac6/cementnaya-promishlennost-i-ekologiya-iyudovichk.pdf> (дата обращения: 14.02.2018).
3. Дуров В.В. Охрана атмосферного воздуха в цементной промышленности // Цемент и его применение. 1998. № 6. С. 2–3.
4. Meo S.A. Health hazards of cement dust // Saudi Med. J. 2004. V. 25, N 9. P. 1153–1159.
5. Kim S.H., Lee C.G., Song H.S., Lee H.S., Jung M.S., Kim J.Y., Park C.H., Ahn S.C., Yu S.D. Ventilation impairment of residents around a cement plant // Annal. Occup. Environ. Med. 2015. V. 27, N 3. P. 1–10.
6. Горчакова А.Ю. О влиянии цементного производства на растения // Изв. Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, № 1. С. 120–126.
7. Ерофеев Ю.В., Турбинский В.В., Щербатов А.Ф., Новикова И.И. Гигиеническая оценка загрязнений атмосферного воздуха цементной пылью // Вопросы гигиены. 2017. Т. 26, № 4. С. 189–192.
8. Eom S.-Y., Cho E.-B., Oh M.-K., Kweon S.-S., Nam H.-S., Kim Y.-D., Kim H. Increased incidence of respiratory tract cancers in people living near Portland cement plants in Korea. // Int. Arch. Occup. Environ. Health. 2017. V. 90. P. 859–864.
9. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 182 с.
10. Шамрикова Е.В., Ванчикова Е.В., Рязанов М.А., Казаков В.Г. Состояние снежного и почвенного покрова

- вблизи цементного завода // Вода: химия и экология. 2010. № 10. С. 46–51.
11. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорол. и гидрол. 2013. № 3. С. 94–106.
  12. Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Геохимия взвешенных веществ в зимней атмосфере Якутска (по снежному покрову) // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 10. С. 765–768. DOI: 10.15372/AOO20211003.
  13. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 278 с.
  14. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 272 с.
  15. 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 // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 2. С. 55–66.
  16. Рапута В.Ф. Модели реконструкции полей длительных выпадений аэрозольных примесей // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 506–511.
  17. Тихонов Н.А., Захарова С.А., Давыдова М.А. Моделирование динамики образования шлейфа NO<sub>2</sub> от точечного источника // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 722–727; Tikhonov N.A., Zakharova S.A., Davydova M.A. Simulation of the dynamics of an NO<sub>2</sub> plume from a point source // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 1. P. 45–49.
  18. Пожитков Р.Ю., Тигеев А.А., Московченко Д.В. Оценка пылевых выпадений в снежном покрове с использованием данных дистанционного зондирования Земли (на примере г. Нижневартовск) // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 10. С. 767–773; Pozhitkov R.Yu., Tigeev A.A., Moskovchenko D.V. Estimation of dust depositions in snow cover using Earth's remote sensing data: Example of Nizhnevartovsk // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 1. P. 19–25.
  19. 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. Т. 12, № 2. С. 50–60.
  20. Крутских Н.В., Кравченко И.Ю. Использование космоснимков Landsat для геоэкологического мониторинга урбанизированных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 2. С. 159–168.
  21. Riggs G., Hall D., Salomonson V. A Snow Index for the Landsat Thematic Mapper and Moderate Resolution Imaging Spectrometer // Geosci. Remote Sens. Symposium. IGARSS '94, V. 4: Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis, and Interpretation. 1994. P. 1942–1944.
  22. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V., DiGirolamo N.E., Bayr K.J., Jin J.M. MODIS snow-cover products // Remote Sens. Environ. 2002. V. 83, N 1. P. 181–194.
  23. Климат Новосибирска: справочное издание / Кошинский С.Д., Швер Ц.А. (ред.). Л.: Гидрометеониздат, 1979. 223 с.
  24. Волощук А.М. Руководство по капиллярному электрофорезу: методическое пособие. М.: Химия. 1996. 111 с.
  25. Руденко Б.А., Руденко Г.И. Высокоэффективные хроматографические процессы. М.: Наука, 2003. Т. 2. 286 с.

*V.F. Raputa, V.V. Kokovkin, R.A. Amikishieva. The ground and satellite monitoring of snow cover contamination in a cement plant environs.*

The results of experimental and numerical studies of long-term atmospheric contamination of the cement plant environ in the Iskitim city of Novosibirsk region are discussed. The object under the study is the snow cover. There are the data of network measurements of hydrogen value (pH), ionic components, suspended matter content accumulated for winter 2018/19.

The numerical reconstruction of the pollution fields was carried out using low-parameter models in the approximations of a light and monodisperse impurity. A statistical analysis of the relationship between the content of impurities in snow samples and the values of the snow index (NDSI) calculated from high-resolution satellite images was carried out.