

УДК 551.577

## Исследование нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби

В.П. Шевченко<sup>1</sup>, С.Н. Воробьёв<sup>2</sup>, С.Н. Кирпотин<sup>3</sup>, И.В. Крицков<sup>3</sup>,  
Р.М. Манасыпов<sup>3</sup>, О.С. Покровский<sup>3</sup>, Н.В. Политова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
НИИ биологии и биофизики  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Центр Превосходства «BioClimLand»  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 20.01.2015 г.

Исследовались нерастворимые частицы снежного покрова на меридиональном профиле от Томска до эстуария Оби в конце зимы (определены их концентрации и вещественно-генетический состав). Наиболее низкие значения концентраций частиц были отмечены в северо-западной части Томской области и в Ямало-Ненецком автономном округе на участке от пос. Губкинский до восточного побережья эстуария р. Обь вблизи пос. Ямбург. Самые высокие концентрации нерастворимых частиц были отмечены вблизи г. Томска и в Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах на участке от г. Сургут до пос. Губкинский. В составе большинства проб преобладали минеральные частицы, кроме них присутствовали биогенные частицы (волокна, створки диатомовых водорослей, пыльца) и частицы, образовавшиеся в результате сгорания различных видов топлива (пепел и черный углерод). Важными источниками пепловых частиц и сажи являются факелы сжигания попутного газа, автотранспорт и отопительные системы.

*Ключевые слова:* снежный покров, Западная Сибирь, осадочное вещество, сканирующий электронный микроскоп; snow cover, Western Siberia, sedimentary matter, scanning electronic microscope.

### Введение

Снежный покров обладает рядом свойств, делающих его природным архивом и индикатором состояния экосистемы [1–5]. Снег вымывает из атмосферы нерастворимые аэрозольные частицы (рассеянная форма осадочного вещества) и растворенные вещества, включая загрязнения. В отличие от дождя, вода которого уходит в почву или стекает с поверхности льдов, снег сохраняется на поверхности почвы и дрейфующих льдов и таким образом фиксирует все атмосферные выпадения за снежный период года. Осадочное вещество снега характеризует зимнюю атмосферу, когда суша покрыта снегом, а реки, озера и моря — слоем льда, т.е. поступление аэрозольного минерального вещества из почвы

почвы прилегающих районов минимально, поэтому главное значение приобретает вещество дальнего (сотни и тысячи километров) переноса [6–8].

Исследование нерастворимых частиц в снежном покрове различных районов, в том числе и Западной Сибири, активно проводится рядом ученых [2, 9–24 и др.]. Однако изучение распределения концентраций нерастворимых частиц и их вещественного состава в снежном покрове Западной Сибири на разрезе от южной тайги до тундры ранее не проводилось. Цель нашей работы заключалась в проведении таких исследований в конце зимнего сезона.

### Материалы и методы

Нерастворимые частицы в снежном покрове Западной Сибири были изучены на субмеридиональном профиле от окрестностей г. Томска (зона южной тайги) до восточного берега эстуария р. Оби (тундровая зона) в период с 19 февраля по 4 марта 2014 г. Пробы снега были отобраны в 34 точках (рис. 1). Точки находились на расстоянии не менее

\* Владимир Петрович Шевченко (vshevch@ocean.ru); Сергей Николаевич Воробьёв (soil@green.tsu.ru); Сергей Николаевич Кирпотин (kirp@mail.tsu.ru); Иван Викторович Крицков (krickov\_ivan@mail.ru); Ринат Мратович Манасыпов (rmmnassypov@gmail.com); Олег Сергеевич Покровский (oleg@get.obs-mip.fr); Надежда Вячеславовна Политова (politova@ocean.ru).

500 м от автомобильной дороги (зимника). Верхние 5 см снега отбирали в пластмассовые пакеты. В лаборатории снег растапливали при температуре 18–20 °С и фильтровали через предварительно взвешенные лавсановые ядерные фильтры диаметром 47 мм с диаметром пор 0,45 мкм. Состав частиц определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 SEM (Tescan) с микрозондовой приставкой INCA Energy (Oxford Instruments).

## Результаты и их обсуждение

Вблизи г. Томска в точках 1 и 3 (рис. 1 и 2) отмечены сравнительно высокие концентрации нерастворимых частиц (39,1 и 13,4 мг/л соответственно). В обеих точках в составе частиц преобладают минеральные зерна диаметром 1–20 мкм (отдельные до 30 мкм), в основном представленные алюмосиликатами (рис. 3, а, б), и биогенные волокна

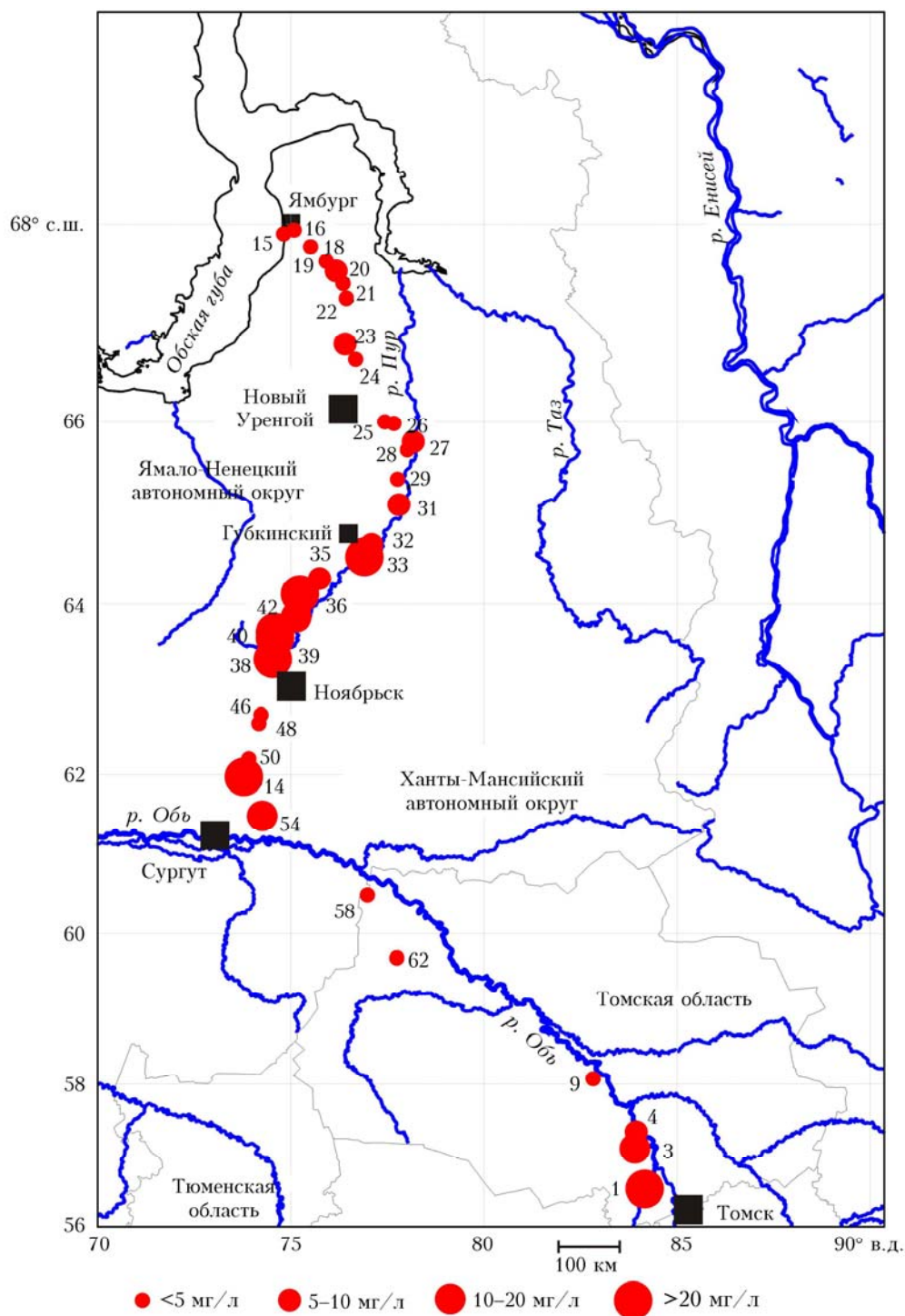


Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб снега. Масштабная линейка приведена для 56° с.ш.

(см. рис. 3, в). В пробах сравнительно много сферических углеродистых пепловых частиц размером несколько микрометров (см. рис. 3, з, э). Отмечено незначительное количество агрегатов черного углерода (сажи) (см. рис. 3, е, ж).

Основным источником минеральных частиц являются, по-видимому, почвы расположенных южнее степных и лесостепных районов, где земли сильно распаханы и толщина снежного покрова относительно небольшая. Выдувание частиц из почвы в таких условиях может быть довольно интенсивным даже зимой [25]. Главным источником пепловых частиц и сажи на этом участке разреза являются промышленность и автотранспорт г. Томска — крупного промышленного центра на юге Западной Сибири. Детально загрязнение снежного покрова г. Томска и его окрестностей нерастворимыми частицами было изучено во многих работах [2, 17, 24 и др.].

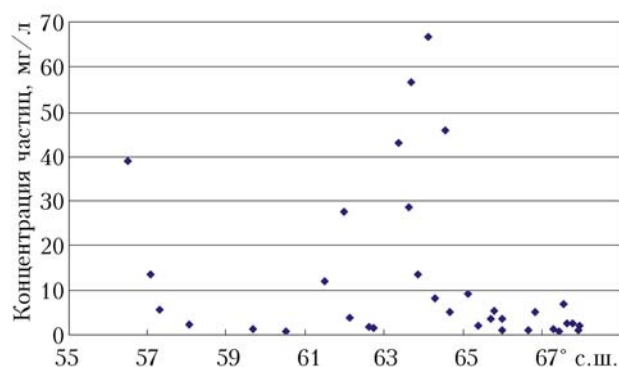


Рис. 2. Зависимость концентрации нерастворимых частиц в снеге от широты на субмеридиональном профиле в Западной Сибири

На участке маршрута от точки 4 до северо-западной границы Томской области (точка 58) концентрации нерастворимых частиц находились в пределах от 0,85 до 5,72 мг/л (см. рис. 1 и 2). Эти значения находятся на фоновом для снежного покрова Арктики и Субарктики уровне [10, 11]. В точке 4 преобладали минеральные частицы размером 1–15 мкм (отдельные до 40 мкм) и биогенные волокна. В точке 62 отмечены обломки створок пенных диатомовых водорослей рода *Fragilaria* (см. рис. 3, з). В пробах зарегистрировано много сферических углеродистых пепловых частиц размером несколько микрометров. Отмечено незначительное количество агрегатов черного углерода (сажи) и пыльцы. В точках 9, 62 и 58 в составе нерастворимых частиц преобладали сферические углеродистые пепловые частицы размером несколько микрометров и минеральные частицы размером 1–15 мкм.

Важными источниками пепловых частиц и сажи являются факелы сжигания попутного газа, автотранспорт и отопительные системы [19]. Химическое загрязнение атмосферы при сжигании попутного нефтяного газа в факелах — опасный фактор негативного воздействия нефтедобывающего ком-

плекса на экологию Западной Сибири и ряда других регионов [26, 27]. Факелы сжигания попутного газа являются важным источником черного углерода в атмосфере не только Западной Сибири, но и морей западного сектора Российской Арктики [28]. Диатомовые водоросли поступают в снежный покров за счет воздушного переноса из морских, речных, озерных районов с незамерзшей водой, где ветром они выдуваются из тонкого поверхностного микрослоя, а также из пересыхающих степных озер, свободных от снега. Наличие створок диатомей в снежном покрове отмечено во многих местах, иногда удаленных на сотни и тысячи километров от районов-источников [10–12, 20].

На участке от точки 54, расположенной вблизи г. Сургута (Ханты-Мансийский автономный округ), до точки 33 (окрестности пос. Губкинский, Ямало-Ненецкий автономный округ) в большинстве проб концентрации нерастворимых частиц были выше 10 мг/л (см. рис. 1, 2), достигая 66,6 мг/л в точке 36. Взвешенное вещество в этих пробах состоит в основном из минеральных частиц размером 1–25 мкм с высоким содержанием сферических углеродистых пепловых частиц, агрегатов черного углерода (сажи), доля пористых пепловых частиц (см. рис. 3, и) и биогенных волокон невысока, отмечены единичные створки диатомей. Вероятно, минеральные частицы поступают на этот участок за счет дальнего переноса из расположенных южнее и юго-западнее лесостепных, степных и полупустынных районов. В период существования устойчивого снежного покрова на этом участке преобладают ветры южного, юго-западного и западного направлений [19]. Эпизоды переноса большого количества минеральной пыли на расстояние в тысячи километров зарегистрированы ранее [12, 29, 30].

На участке между точками 32 (окрестности пос. Губкинский) и 15 (окрестности пос. Ямбург) концентрации нерастворимых частиц были менее 10 мг/л (см. рис. 1, 2), находясь в пределах от 0,82 до 9,22 мг/л (на фоновом для Арктики и Субарктики уровне) [10, 11]. Нерастворимые частицы в снежном покрове представлены в основном минеральными частицами размером 1–15 мкм. Во всех пробах отмечены сферические углеродистые пепловые частицы и в сравнительно небольшом количестве биогенные волокна, агрегаты частиц черного углерода, пористые углеродистые пепловые частицы. Основным путем поставки минеральных частиц является их перенос из расположенных на юге и юго-западе лесостепных, степных и полупустынных районов, поэтому по мере удаления от этих источников уменьшились концентрации и размеры этих частиц. Основными источниками пепла и сажи являются факелы сжигания попутного газа, автотранспорт и отопительные системы. В точке 15, расположенной на побережье Обской губы, были отмечены единичные створки диатомовых водорослей рода *Aulacoseira* (см. рис. 3, д), распространенных в водах эстуария р. Оби [31].

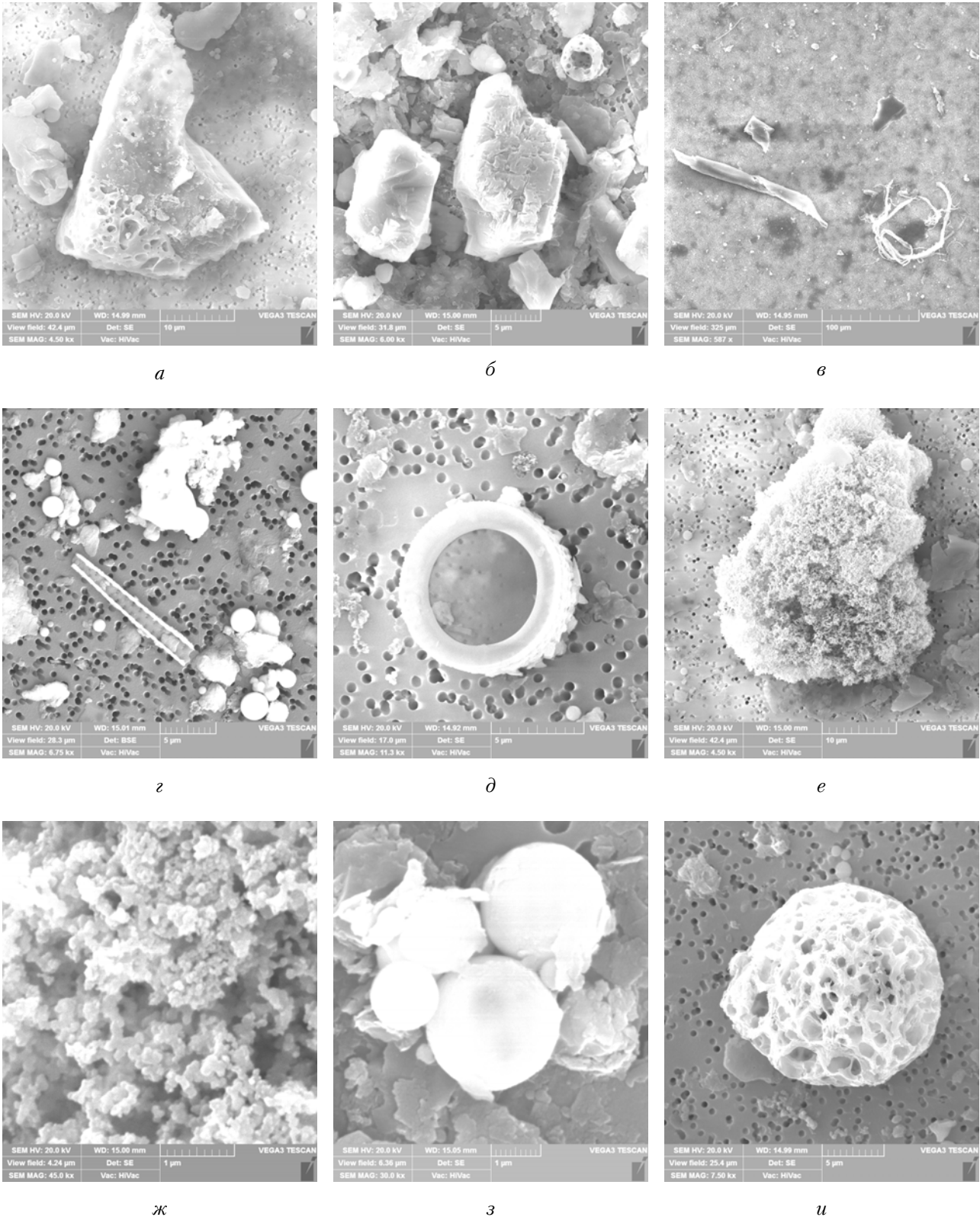


Рис. 3. Наиболее характерные типы нерастворимых частиц в снеге Западной Сибири: *a, б* – минеральные алюмосиликатные частицы; *в* – биогенные волокна; *г* – обломок створки пенной диатомовой водоросли рода *Fragilaria* и сферические углеродистые пепловые частицы; *д* – створка центрической диатомовой водоросли рода *Aulacoseira*; *е, ж* – агрегаты частиц черного углерода (сажи); *з* – сферические углеродистые пепловые частицы; *и* – пористая углеродистая пепловая частица

## Заключение

В поверхностном слое (0–5 см) снежного покрова Западной Сибири на субмеридиональном профиле от г. Томска до восточного побережья эстуария р. Оби концентрации нерастворимых частиц в конце февраля – начале марта 2014 г. варьировали от 0,43 до 66,6 мг/л талой воды. Наиболее низкие значения концентраций частиц (менее 10 мг/л) были отмечены в северо-западной части Томской области и в Ямало-Ненецком автономном округе на участке от пос. Губкинский до восточного побережья эстуария р. Оби вблизи пос. Ямбург. Эти значения находятся на фоне для снежного покрова Арктики и Субарктики уровне. Самые высокие концентрации нерастворимых частиц были отмечены вблизи г. Томска и в Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах на участке от г. Сургут до пос. Губкинский. В составе большинства проб преобладали минеральные частицы, кроме них присутствовали биогенные частицы (волокна, створки диатомовых водорослей, пыльца) и частицы, образовавшиеся в результате сгорания различных видов топлива (пепел и черный углерод). Важными источниками пепловых частиц и сажи являются факелы сжигания попутного газа, автотранспорт и отопительные системы.

Авторы выражают благодарность В.В. Дроздову и А.В. Сорочинскому, принимавшим участие в экспедиционных исследованиях, В.А. Карлову за помощь в выполнении сканирующей электронной микроскопии и академику А.П. Лисицыну за ценные советы. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ВКО-ГЕО-CLIM № 14.В25.31.0001, Программы 44 фундаментальных исследований Президиума РАН (проект «Седиментологические и биогеохимические исследования...») и РФФИ (грант № 14-05-93089 Норв\_а).

1. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 181 с.
2. *Бояркина А.П., Байковский В.В., Васильев Н.В., Глухов Г.Г., Медведев М.А., Писарева Л.Ф., Резчиков В.И., Шелудько С.И.* Аэрозоли в природных планшетах Сибири. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1993. 157 с.
3. *Рапута В.Ф., Коковкин В.В.* Методы интерпретации данных мониторинга загрязнения снежного покрова // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2002. Т. 10, № 5. С. 669–682.
4. *Lisitzin A.P.* Sea-Ice and Iceberg Sedimentation in the Ocean: Recent and Past. Berlin: Springer, 2002. 563 p.
5. *Callaghan T.V., Johansson M., Brown R.D., Groisman P.Ya., Labba N., Radionov V., Bradley R.S., Blangy S., Bulygina O.N., Christensen T.R., Colman J.E., Essery R.L.H., Forbes B.C., Forchhammer M.C., Golubev V.N., Honrath R.E., Juday G.P., Meshcherskaya A.V., Phoenix G.K., Pomeroy J., Rautio A., Robinson D.A., Schmidt N.M., Serreze M.C., Shevchenko V.P., Shiklomanov A.I., Shmakin A.B., Sköld P., Sturm M., Woo M., Wood E.F.* Multiple effects of changes in Arctic snow cover // *Ambio*. 2011. V. 40 (S1). P. 32–45. DOI: 10.1007/s13280-011-0213-x.
6. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р.* Аэрозоли

- Арктики – результаты десятилетних исследований // *Оптика атмосфер. и океана*. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 551–576.
7. *Shevchenko V.* The influence of aerosols on the oceanic sedimentation and environmental conditions in the Arctic // *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*. 2003. N 464. 149 p.
  8. *Шевченко В.П.* Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
  9. *Mullen R.E., Darby D.A., Clark D.L.* Significance of atmospheric dust and ice rafting for Arctic sediment // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1972. V. 83, N 1. P. 205–212.
  10. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И., Деллеф Д., Серова В.В., Штайн Р.* Распределение и состав осадочного материала в снежном покрове дрейфующих льдов Арктики (пролив Фрама) // *Докл. РАН*. 2002. Т. 383, № 3. С. 385–389.
  11. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р., Горюнова Н.В., Ключиткин А.А., Кравчишина М.Д., Кривс М., Новигатский А.Н., Соколов В.Т., Филиппов А.С., Хаас Х. (Haas C.)* Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // *Проблемы Арктики и Антарктики*. № 75. Результаты исследований высокоширотной Арктики в преддверии Международного полярного года. СПб.: АНИИ, 2007. С. 106–118.
  12. *Шевченко В.П., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Алешинская А.С., Богданова О.Ю., Горюнова Н.В., Грищенко И.В., Дара О.М., Завернина Н.Н., Куртеева Е.И., Новичкова Е.А., Покровский О.С., Сапожников Ф.В.* Первые данные о составе пыли, окрасившей снег на Европейском севере России в желтый цвет (март 2008 г.) // *Докл. РАН*. 2010. Т. 431, № 5. С. 675–679.
  13. *Кособокова К.Н., Пантюлин А.Н., Рахор А., Ратькова Т.Н., Шевченко В.П., Агатова А.И., Латина Н.М., Белов А.А.* Комплексные океанографические исследования в Белом море в апреле 2003 г. // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 2. С. 313–320.
  14. *Сысо А.И., Артамонова В.С., Сидорова М.Ю., Ермолов Ю.В., Черевко А.С.* Загрязнение атмосферы, снегового и почвенного покрова г. Новосибирска // *Оптика атмосфер. и океана*. 2005. Т. 18, № 8. С. 663–669.
  15. *Walker T.R.* Comparison of anthropogenic metal deposition rates with excess soil loading from coal, oil and gas industries in the Usa River Basin, NW Russia // *Polish Polar Research*. 2005. V. 26, N 4. P. 299–314.
  16. *Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Девятова А.Ю.* Сравнительная оценка состояния длительного загрязнения атмосферы и снежного покрова г. Новосибирска на сети стационарных постов Гидрометеослужбы // *Оптика атмосфер. и океана*. 2010. Т. 23, № 6. С. 499–504.
  17. *Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В.* Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. 264 с.
  18. *Голохваст К.С., Соболева Е.В., Никифоров П.А., Христофорова Н.К., Гульков А.Н.* Анализ нано- и микрочастиц в снеге г. Уссурийск // *Вода: химия и экология*. 2012. № 11. С. 108–112.
  19. *Московченко Д.В., Бабушкин А.Г.* Особенности формирования химического состава снеговых вод на территории Ханты-Мансийского автономного округа // *Криосфера Земли*. 2012. Т. XVI, № 1. С. 71–81.
  20. *Топчая В.Ю., Чечко В.А., Шевченко В.П.* Вещественный состав эолового материала, содержащегося в снежном покрове береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря // *Оптика атмосфер. и океана*. 2012. Т. 25, № 6. С. 518–522.

21. Голохваст К.С. Атмосферные взвеси городов Дальнего Востока России. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2013 (Библиотека журнала «Успехи наук о жизни»). 178 с.
22. Ермолов Ю.В., Махатков И.Д., Худяев С.А. Фоновые концентрации химических элементов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 9. С. 790–800.
23. Макаров В.Н. Геохимия снежного покрова таежных и горных мерзлотных ландшафтов Якутии // Лед и снег. 2014. № 1 (125). С. 73–80.
24. Таловская А.В., Симоненков Д.В., Филимоненко Е.А., Белан Б.Д., Язиков Е.Г., Рычкова Д.А., Ильенок С.С. Исследование состава пылевого аэрозоля на фоновой и городской станциях наблюдения в Томском регионе зимой 2012/13 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 999–1005.
25. Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Ромашова Т.Н., Осинцева Н.В. Ветровая эрозия почв в холодный период года на Томь-Яйском междуречье (Западная Сибирь) // Геогр. и природ. ресурсы. 2003. № 3. С. 101–105.
26. Раныта В.Ф. Экспериментальные и численные исследования аэрозольных выпадений примесей в окрестности нефтегазового факела // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13, № 3. С. 96–102.
27. Яценко И.Г., Сваровская Л.И., Алексеева М.Н. Оценка экологического риска сжигания попутного нефтяного газа в Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 560–564.
28. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N. Black carbon in the Arctic: The underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 8833–8855. DOI: 10.5194/acp-13-8833-2013.
29. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 391 с.
30. Лисицын А.П. Аридная седиментация в Мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геол. и геофиз. 2011. Т. 52, № 10. С. 1398–1439.
31. Макаревич П.Р. Планктонные альгоценозы эстуарных экосистем. М.: Наука, 2007. 223 с.

*V.P. Shevchenko, S.N. Vorob'ev, S.N. Kirpotin, I.V. Kritskov, R.M. Manasypov, O.S. Pokrovsky, N.V. Politova. Investigations of insoluble particles in the snow cover of the Western Siberia from Tomsk to the Ob estuary.*

Insoluble particles of snow cover along the meridional profile from Tomsk to the Ob estuary in late winter were investigated. The lowest values of particle concentrations were observed in the north-western part of the Tomsk region and in the Yamal-Nenets Autonomous District (from Gubkinsky village to the east coast of the Ob estuary near Yamburg village). The highest concentrations of insoluble particles were observed near the city of Tomsk and in the Khanty-Mansi and Yamal-Nenets autonomous districts in the area from Surgut to Gubkinsky village. Mineral particles were dominated in the samples' composition, furthermore biogenic particles (fibers, leaf diatoms, pollen) and particles formed by the combustion of various fuels (ash and black carbon) prevailed. Important sources of black carbon and ash particles are chimney fires of associated gas, motor transport, and heating systems.