

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 551.321.7:004.932:502.1:528.854

DOI: 10.17072/2079-7877-2021-2-121-134

ОЦЕНКА ПЫЛЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НАЗЕМНЫМИ И ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ (НА ПРИМЕРЕ Г. ТОБОЛЬСК)

Александр Анатольевич ТигеевORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5449-5086>, Scopus Author ID: 57202682147,

SPIN-код: 3978-3615, Author ID: 124760

e-mail: ttruubbaa@mail.ru*Тюменский научный центр СО РАН, г. Тюмень, Россия***Николай Владиславович Аксёнов**ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6884-7262>e-mail: aksenov7242@gmail.com*Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия***Дмитрий Валерьевич Московченко**ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6338-7669>, SPIN-код: 1737-1501, Author ID: 100984e-mail: moskovchenko@hotmail.ru*Тюменский научный центр СО РАН, г. Тюмень, Россия***Роман Юрьевич Пожитков**ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7957-1337>, SPIN-код: 1488-6874, Author ID: 1027751e-mail: pozhitkov-roma@yandex.ru*Тюменский научный центр СО РАН, г. Тюмень, Россия*

Снежный покров, являющийся эффективным накопителем пылевых выпадений, дает объективную информацию об уровне загрязнения, но на больших территориях опробование занимает длительное время. Использование данных дистанционного зондирования (ДДЗ) позволяет существенно упростить оценку уровня запыления атмосферы. На примере г. Тобольск выполнена оценка информативности различных индексов, вычисляемых с применением ДДЗ и используемых для оценки распространения и свойств снежного покрова (нормализованный разностный индекс NDSI, нормированный индекс S3, индекс загрязнения SCI). Данные о пылевой нагрузке и физико-химических свойствах снега, полученные в ходе опробования и последующих анализов, были сопоставлены со спектральными свойствами снежного покрова. Определено, что пылевая нагрузка в городе составляет в среднем 32,1 мг/м² в сутки, что приблизительно в 8 раз больше фоновых значений. Наблюдается рост рН и минерализации снеготалых вод, уровень подщелачивания умеренный. В промышленной зоне (Тобольский нефтехимический комбинат) рост пылевых выпадений не отличается по сравнению с другими функциональными зонами города. Уровень запыления максимален в зоне многоэтажной застройки и на улицах с наибольшей интенсивностью движения транспорта. Установлено, что спектральные индексы индицируют количество твердых примесей в снеге и уровень подщелачивания. Выявлена достоверная корреляционная зависимость между количеством нерастворимых частиц в снеге и индексом S3, между рН и индексом SCI. Сделан вывод, что указанные индексы могут быть использованы для анализа экологической ситуации на урбанизированных территориях.

Ключевые слова: спутниковые снимки Земли, снеговые индексы, геохимия, снежный покров.

ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC DUST CONTAMINATION WITH GROUND-BASED AND REMOTE SENSING METHODS (ON THE EXAMPLE OF THE TOWN OF TOBOLSK)

Alexander A. TigeevORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5449-5086>, Scopus Author ID: 57202682147,

*Экология и природопользование**Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.*

SPIN-code: 3978-3615, Author ID: 124760
e-mail: ttrruubbaa@mail.ru e-mail: ttrruubbaa@mail.ru
Tyumen scientific center SB RAS, Tyumen, Russia

Nikolay V. Aksenov
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6884-7262>
e-mail: aksenov7242@gmail.com
Tyumen State University, Tyumen, Russia

Dmitriy V. Moskovchenko
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6338-7669>, SPIN-code: 1737-1501, Author ID: 100984
e-mail: moskovchenko@hotmail.ru
Tyumen scientific center SB RAS, Tyumen, Russia

Roman Yu. Pozhitkov
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7957-1337>, SPIN-code: 1488-6874, Author ID: 1027751
e-mail: pozhitkov-roma@yandex.ru
Tyumen scientific center SB RAS, Tyumen, Russia

Snow cover is an effective accumulator of dust fallout and provides objective information on the level of pollution, but its sampling in large areas takes a long time. The use of remote sensing data (RSD) makes it possible to significantly simplify the assessment of the dust load in the atmosphere. Based on RSD from the town of Tobolsk, we evaluated the information value of various indices used to assess the distribution and properties of snow cover (NDSI, normalized S3 index, and SCI). Data on dust load and physicochemical properties of the snow obtained during sampling and subsequent analysis were compared with the spectral properties of the snow cover. It was determined that the dust load in the town averaged 32,1 mg/m² per day, which is approximately 8 times higher than the background values. The degree of alkalization is moderate, an increase in pH and salinity of snowmelt waters is observed. In comparison with other functional zones of the town, no increase in dust fallout was detected in the industrial zone (Tobolsk Petrochemical Plant). The level of dustiness is maximum in the zone of multistory buildings and on the streets with the highest traffic intensity. It was established that spectral indices indicate the amount of solid impurities in snow and the level of alkalization. A statistically significant correlation was found between the amount of insoluble particles in snow and the S3 index as well as between pH and the SCI index. The paper concludes that these indices can be used to assess the environmental situation in urbanized areas.

К е у в о р д с : Satellite images of the Earth, snow indices, geochemistry, snow cover.

Введение

В настоящее время во многих городах России экологическая ситуация близка к критической [3]. Рост угроз обуславливает необходимость совершенствования системы мониторинга на урбанизированных территориях и привлечения новых методов анализа параметров природной среды. В Сибири, где продолжительность периода с отрицательными температурами воздуха составляет от 5 до 9 месяцев, одним из наиболее информативных объектов экологического мониторинга является снежный покров. Зимой содержание как растворенных, так и взвешенных веществ в осадках, как правило, выше, чем в теплое время года. К примеру, суммарное содержание ионов в снеготалых водах с водосборов Средней Оби приблизительно вдвое превышает содержание в дождевых осадках [26]. Кристаллы снега загрязняются уже в процессе своего образования за счёт поглощения мелких частиц (ядер кристаллизации), взвешенных в атмосфере, при выпадении снега также происходят захват и осаждение аэрозольных элементов [1]. Сказывается также увеличение эмиссий загрязняющих веществ в зимний период, связанное с ростом выбросов от объектов теплоэнергетики, жилых зон при отоплении домов. Оказывает влияние и господство антициклонов со свойственным им застоем воздуха, что обуславливает концентрированию загрязнителей. Поэтому снежный покров является надежным источником сведений о загрязнении атмосферного воздуха и индикатором техногенных геохимических аномалий в других компонентах ландшафта, дает интегральную оценку состояния урболандшафтов за холодный период [7; 11; 12; 27].

В 2020 г. нами было проведено изучение геохимических свойств снежного покрова Тобольска и прилегающей фоновой территории. Цель работы заключается в оценке уровня аэротехногенного загрязнения в г. Тобольск по данным изучения химического состава снежного покрова. Известно, что основная масса загрязнителей, выпадающих из атмосферы, содержится в пылевых выпадениях. По оценке Н.С. Касимова с соавторами [12], до 90% количества тяжелых металлов концентрируется в твердой нерастворимой фазе. Оценка количества пылевых выпадений проводится путем фильтрации через бумажные либо нитроцеллюлозные фильтры с последующим взвешиванием. Обычно исследователи ограничиваются относительно небольшим количеством проб вследствие трудоемкости процесса. Вместе с тем давно разработаны методы дистанционного анализа уровня запыления снегового покрова [36; 37]. Поступление пыли существенно снижает альбедо снега [43], что можно использовать для изучения количества пылевых выпадений. По аналогии с вегетационным индексом NDVI предложен нормализованный разностный индекс снега NDSI, основанного на различной отражательной способности снега в видимой и инфракрасной частях спектра. Значения $NDSI > 0,4$ индицируют наличие снегового покрова [38].

В последние два десятилетия дистанционные методы широко используются для оценки загрязнения в районах нефтедобычи и нефтепереработки, что связано с такими преимуществами, как охват больших территорий, высокая оперативность, возможность многократно наблюдать исследуемые участки, достоверность и простота получения информации [5]. Многие работы направлены на изучение снежного покрова дистанционными методами. Для оценки уровня загрязнения снега наиболее распространёнными критериями являются его отражательные характеристики в различных зонах спектра и вычисляемые на их основе снежные индексы [13; 29; 35]. В результате дешифрирования космоснимков проведена оценка площади загрязнения снежного покрова в различных федеральных округах России, в том числе Уральском [23]. Разработан метод выделения зон аэротехногенного загрязнения вокруг промышленных объектов в тундровой зоне с использованием сопоставления результатов химического анализа образцов снежного покрова и яркостных характеристик поверхности [6]. С использованием данных спутникового спектрорадиометра MODIS проведено изучение загрязнения в крупных городах Западной Сибири [13; 24; 29]. Однако в Тюменской области дистанционные исследования уровня запыления снега по данным снеговых индексов ранее не осуществлялись. Поэтому нами, помимо прямых измерений количества пылевых частиц в снеге, определения химических свойств снеготалых вод, была проведена обработка космоснимков для оценки зависимости их спектральных характеристик и уровня запыления.

Материалы и методы

В Тюменской области изучение экологического состояния городской среды проводилось главным образом в Тюмени, в то время как второй по численности населения г. Тобольск исследован весьма слабо. Вместе с тем по количеству выбросов в атмосферу от стационарных источников Тобольск незначительно уступает Тюмени [22]. Численность населения Тобольска на 2020 г. составляет 102,0 тыс. чел. [19]. Крупнейшим промышленным предприятием является ООО «СИБУР Тобольск» (ранее Тобольский нефтехимический комбинат). Основным направлением деятельности предприятия является переработка легких углеводородов, поставляемых по продуктопроводу газоперерабатывающими заводами севера Тюменской области. В Тобольске также функционируют предприятия энергетики (Тобольская ТЭЦ), машиностроения, развито производство стройматериалов. Промышленная зона города, образованная нефтехимическим комбинатом и ТЭЦ, расположена на расстоянии 8 км в восточном направлении от зоны жилой застройки. Через

Экология и природопользование
Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

Тобольск идут потоки автомобильного и железнодорожного транспорта в северные нефтегазодобывающие районы. Среди функциональных зон города преобладают участки, относящиеся к зонам транспортной инфраструктуры, производственной и коммунально-складской [19].

Тобольск расположен в юго-западной части Западно-Сибирской равнины, в подзоне южной тайги [8]. Климат континентальный, с продолжительной холодной зимой. Устойчивый снежный покров залегает в среднем 5,5 месяцев, с 30 октября по 14 апреля [17]. Преобладают ветра южного и западного направлений. Из годового количества осадков на холодный период приходится около 20%.

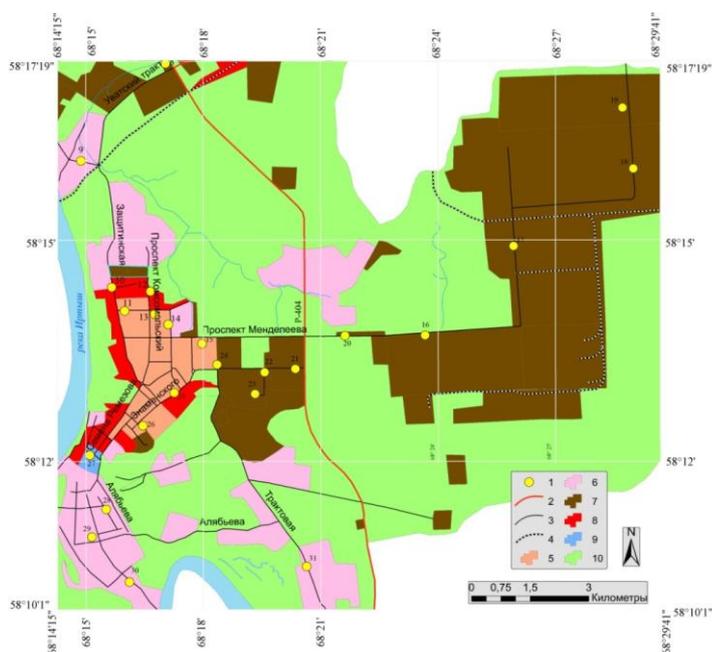


Рис. 1. Схема опробования:

- 1 – пункты опробования; 2 – федеральная автотрасса Р-404;
3 – железная дорога Тюмень-Сургут;
4 – дороги общегородского пользования; 5 – зона многоэтажной застройки; 6 – зона малоэтажной застройки; 7 – зоны производственного и коммунально-складского назначения;
8 – общественно-деловая зона; 9 – зона историко-культурного центра города;
10 – рекреационная зона (создана авторами по полевым материалам 2020 г.)
- Fig. 1. Sampling scheme. 1 – sampling points; 2 – federal highway R-404; 3 – Tyumen-Surgut railway;
4 – town-wide roads; 5 – multi-storey development zone; 6 – low-rise development zone; 7 – industrial and municipal storage areas;
8 – public and business zone;
9 – historical and cultural center of the town;
10 – recreational zone (created by the authors on field data of 2020)

дистиллированной водой, и доставляли в химико-экологическую лабораторию. Всего было отобрано 8 проб на фоновой территории и 23 – в городе.

При отборе проб определяли глубину снежного покрова, плотность снега и влагозапас. Пробы помещали в пластиковые контейнеры с крышкой и доставляли в лабораторию. В общей сложности на территории города были отобраны 24 пробы, на фоновых участках – 7 проб. Таяние снега происходило при комнатной температуре. В талых пробах измеряли

Опробование снежного покрова было проведено 9–10 марта 2020 г. По данным метеонаблюдений, формирование устойчивого снежного покрова в зимний период 2019–2020 гг. началось 8 ноября, количество осадков, выпавшее до начала опробования, составило 101 мм [2], что близко к среднемноголетним величинам. В зимний период 2019–2020 гг. наблюдалось отчетливое доминирование ветров южного, юго-западного и юго-восточного румбов.

Исследования проводились по общепринятой методике [25; 33]. Смешанные пробы отбирали весовым снегомером ВС-43 на территории города и на фоновых участках, удаленных от города на расстояние от 9 до 20 км в северном, южном и юго-восточном направлениях. Одновременно определяли высоту покрова, плотность снега и влагозапас. Условно-фоновые пробы были отобраны в разных ландшафтных условиях – на безлесных участках, в таежном лесу и на сельхозугодьях. Чтобы исключить попадание частиц почвы, нижние 3 см снега удаляли. Пробы помещали в пластиковые контейнеры с крышкой объемом 24 дм³, предварительно промытые

Экология и природопользование

Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

величину рН с использованием ионометра HydroMaster НМ-500. Минерализацию и электропроводность определяли с помощью кондуктометра СОМ-100. Затем пробы были профильтрованы через предварительно взвешенные на лабораторных аналитических весах беззольные нитроцеллюлозные фильтры (Millipore™) с размером пор 0,45 мкм. После высушивания определяли массу пыли, осевшей на фильтре, и вычисляли ее концентрацию (мг/л). Также была подсчитана пылевая нагрузка P_n по формуле

$$P_n = m/S * T, \quad (1)$$

где m – масса пыли на фильтре, S – суммарная площадь отбора проб, T – временной интервал в сутках между моментом опробования и датой установления устойчивого снежного покрова (123 дня).

В качестве материала для оценки загрязнения снежного покрова использовался мультиспектральный спутниковый снимок Landsat 8 (сенсор OLI), сделанный в период полевого опробования (26 марта 2020 г). Снимок находится в открытом доступе [42]. Формат изображения выбранной спутниковой системы Landsat-8 – GeoTIFF. Для определения взаимосвязи интенсивности осаждения пылевых частиц на поверхность снежного покрова со спектральной отражательной способностью поверхности были рассчитаны три индекса, предназначенные для оценки распространения и свойств снежного покрова: нормализованный разностный индекс снега (NDSI), нормированный индекс снега S_3 и индекс загрязнения (SCI).

NDSI, разработанный для оценки распространения снежного покрова, основан на различной отражательной способности снега в видимой и инфракрасной частях спектра [38]. Для снимков Landsat формула расчёта NDSI имеет вид

$$NDSI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR), \quad (2)$$

где Green и SWIR – коэффициент отражения в зелёной (0,53–0,6 мкм) и инфракрасной зонах (1,560–1,660 мкм).

Для случаев, когда снежный покров закрыт растительностью, был разработан нормированный индекс снега S_3 [41]

$$S_3 = NIR * (Red - SWIR) / (NIR + Red) * (NIR + SWIR), \quad (3)$$

где NIR, Red и SWIR – коэффициенты отражения в ближней инфракрасной (0,85–0,89 мкм), видимой красной (0,63–0,68 мкм) и инфракрасной (1,56–1,66 мкм) зонах спектра.

Эффект загрязнения снега атмосферными аэрозолями или углеродной сажей является максимальным в видимой области и уменьшается с увеличением длины волны. В ближнем ИК, за пределами 1300 нм, влияние загрязнения незначительно [39]. Исходя из этого был предложен индекс загрязнения снега SCI [40]

$$SCI = (Blue - Green) / (Blue + Green), \quad (4)$$

где Blue – коэффициент отражения в синей (0,450–0,515 мкм), Green – в зелёной (0,53–0,6 мкм) зонах.

Вычисления индексов проводились в программном комплексе ENVI 5,3 с использованием инструментов «Tollbox», «Band Algebra» (Алгебра каналов). Затем с применением инструмента «Band Match» была построена растровая поверхность со значениями индексов. По полученным растровым изображениям с помощью координат определялось значение индекса для каждого пикселя, на которое попадала точка отбора проб снега. Статистическая обработка данных была выполнена с помощью пакетов Microsoft Office Excel и Statistica 6,0. Были рассчитаны средние значения физико-химических параметров и снеговых индексов для фоновой и урбанизированной территорий. Достоверность различий определяли путем вычисления критерия Манна-Уитни. Для оценки

Экология и природопользование
Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

зависимости спектральных характеристик снежного покрова от величины пылевой нагрузки, рН и плотности снега были проведен корреляционный анализ. Использована ранговая корреляция Спирмена, так как выборки по некоторым параметрам, например, по минерализации, количеству нерастворимых частиц в снеготалых водах, содержали аномальные значения (выбросы).

Результаты и обсуждение

Средняя высота снежного покрова в пределах городской застройки составила в городе 50 см, на фоновых участках – 49 см (табл. 1). Плотность снега была одинакова – 0,22 г/см³. Таким образом, условия снегонакопления были сходными как на урбанизированной территории, так и в загородной зоне.

Таблица 1

Физические характеристики снежного покрова и показатели пылевых выпадений
Physical characteristics of snow cover and indicators of dust fallout

<i>Показатель</i>	<i>Тобольск</i>	<i>Фоновая территория</i>
Глубина снежного покрова, см	$\frac{25-70}{50}$	$\frac{29,5-63}{49}$
Плотность снега, г/см ³	$\frac{0,17-0,29}{0,22}$	$\frac{0,19-0,27}{0,22}$
рН талых вод	$\frac{5,0-6,6}{6,0}$	$\frac{4,6-5,8}{5,1}$
Минерализация, мг/л	$\frac{5,1-563,0}{51,4}$	$\frac{7,7-17,5}{11,1}$
Электропроводность, MS/см	$\frac{2,7-781,0}{67,7}$	$\frac{12,2-27,0}{17,2}$
Содержание нерастворимых частиц, мг/л	$\frac{4,4-316,3}{30,2}$	$\frac{2,2-22,6}{5,7}$
Пылевая нагрузка, мг/м ² в сутки	$\frac{4,3-406,3}{32,1}$	$\frac{1,4-11,6}{4,0}$

Примечание: числитель – пределы варьирования, знаменатель – среднее значение

Note: the numerator is the range of variation, the denominator is the average value

Снеготалые воды на фоновых участках имели слабокислую реакцию. Среднее значение рН (5,1 ед.) было несколько ниже, чем средняя величина рН снеготалых вод на территории ХМАО-Югры (5,3 ед.) [16]. В городе встречаются пробы как с кислой, так и нейтральной реакцией (рН 5,0–6,6). Увеличение среднего значения рН по сравнению с фоном составило 0,9 единиц. Причиной такого роста является выпадение карбонатных пылевых частиц [33]. Уровень подщелачивания в Тобольске можно оценить как умеренный. В Нижневартовске был выявлен более существенный рост рН – от 5,5 ед. на фоновом участке до 7,1 на территории города [20].

На фоновой территории минерализация снеготалых вод в среднем составила 11,1 мг/л. Полученная величина, судя по литературным источникам [9; 15], типична для фоновых условий в Западной Сибири. Считается, что атмосферные осадки с минерализацией $M \leq 15$ мг/л характеризуют фоновые условия [28]. В Тобольске средняя величина минерализации снеготалых вод составила 51,4 мг/л, максимальное значение (563 мг/л) было отмечено вблизи автотрассы, соединяющей городскую застройку с промзоной, и вызвано использованием противогололедных реагентов. Рост минерализации снеготалых вод является обычным процессом на урбанизированных территориях. Так, в Восточном административном округе Москвы минерализация снеготалой воды в 4 раза выше фонового значения и увеличивается вдоль автомагистралей и в жилой зоне высокой этажности в 6–9 раз [12].

Экология и природопользование
Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

Электропроводность снеготалых вод в городе по сравнению с фоном значительно увеличивается. Экологической нормой предложено считать значение проводимости осадков 60 мкСм/см [28]. В Тобольске это значение превышено в 4 пробах (17%).

В снеге полярных районов, не подверженных влиянию местных источников воздействия, содержание пылевых частиц составляет 0,2–3 мг/л [32]. В районе Тобольска содержание пыли в снеге на фоновых участках превышало эти значения и в среднем составило 5,7 мг/л, что свидетельствует о наличии полей рассеяния от разнообразных источников, как местных, так и удаленных. Влияние поллютантов от крупных промышленных предприятий Урала на юге Тюменской области отмечалось в работе [4].

Значения пылевой нагрузки на фоновой территории изменялись от 1,4 до 11,6 мг/м² в сутки (в среднем 4,0 мг/м²). В Томской области фоновая величина суточных пылевых выпадений равна 7 мг/м² [34]. На территории Омской и Новосибирской областей количество пылевых выпадений меньше – около 3 мг/м² в сутки [10; 14]. Таким образом, в районе Тобольска фоновая величина пылевой нагрузки находится на среднем уровне по сравнению с сопредельными регионами Сибири.

В городе содержание пылевых частиц увеличивается до 30,2 мг/л, а пылевая нагрузка – до 32,1 мг/м² в сутки (средние значения). Нормативной величиной пылевой нагрузки считается 200 мг/м² в сутки [12]. Только в одном пункте наблюдений это значение было превышено. Максимальное значение (406 мг/м² в сутки) было выявлено в той же точке, где и наибольшая минерализация снеготалых вод – вблизи автотрассы, соединяющей городскую застройку с промзоной. По данным предшествующих исследований, проведенных на участках интенсивного техногенеза, значения P_n на 1–2 порядка выше, чем в Тобольске. Так, в Норильском промышленном районе пылевая нагрузка местами превышает 1000 мг/м² в сутки [18]. В городах показатели P_n сходные с Тобольском. Средняя величина суточных выпадений твердых частиц из атмосферы за зимний период в восточном административном округе Москвы – 27 мг/м² [12]. В Томске в 2011 и 2013 гг. отмечены значения P_n соответственно 25 и 28 мг/м² [30].

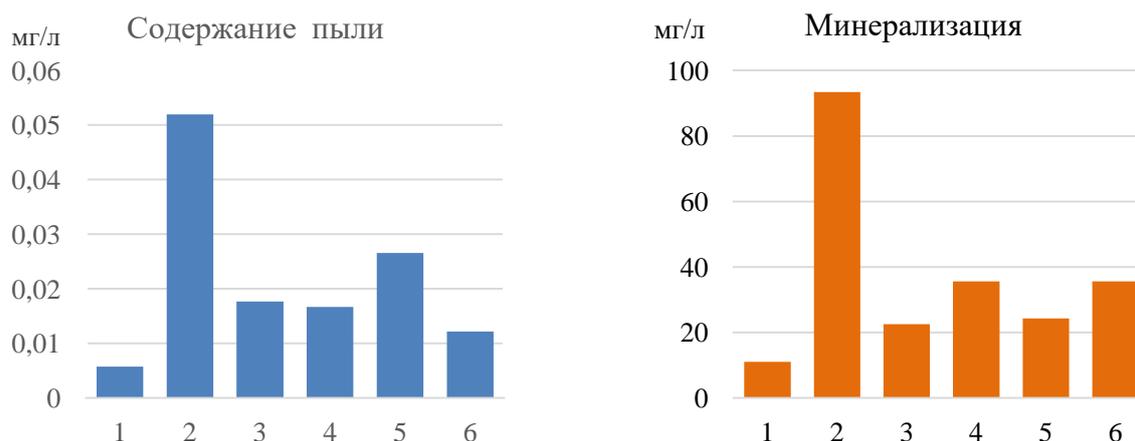


Рис. 2. Пылевая нагрузка и содержание водорастворимых солей в различных функциональных зонах города и разных типах растительности фоновых участков:

1 – фоновые участки, 2 – зона многоэтажной застройки, 3 – промзона, 4 – зона одноэтажной застройки, 5 – пригород с малоэтажной застройкой, 6 – исторический центр

(составлено авторами по полевым материалам 2020 г.)

Fig. 2. Dust load and water-soluble salt content in different functional areas of the town and different types of vegetation in the background areas.

1 – background plots, 2 – multi-storey development zone, 3 – industrial zone, 4 – single-storey development zone, 5 – suburb with low-rise buildings, 6 – historical center (compiled by the authors on field materials in 2020)

Экология и природопользование

Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

Анализ распределения пылевых выпадений по функциональным зонам показал, что крупнейшие промышленные объекты Тобольска (ТЭЦ, производственные мощности ООО «Сибур-Тобольск») слабо влияют на уровень запыления атмосферы. Снег в промышленной зоне отличается низкими показателями пылевой нагрузки и содержания водорастворимых солей (рис. 2). В предшествующих экологических исследованиях промзоны Тобольска были выявлены только единичные случаи превышения содержания взвешенных частиц в снеготалых водах по сравнению с фоновым уровнем и не отмечено прямой связи между размещением загрязненных участков и преобладающими направлениями распространения выбросов от техногенных источников [31].

Результаты подсчетов снеговых индексов на территории Тобольска представлены в табл. 2.

Значения NDSI изменялись от 0,18 до 0,53 на фоновом участке и от 0,05 до 0,57 в городе, средние значения составили, соответственно, 0,42 и 0,46.

Таблица 2

Значения снеговых индексов на территории г. Тобольска, 26 марта 2020 г.
Snow index values on the territory of Tobolsk, March 26, 2020

Показатель	Фоновая территория	Город
NDSI	$\frac{0,18-0,53}{0,42}$	$\frac{0,05-0,57}{0,47}$
S3	$\frac{0,53-1,08}{0,85}$	$\frac{0,08-1,09}{0,46}$
SCI	$\frac{0,046-0,076}{0,061}$	$\frac{0,0151-0,057}{0,030}$

Примечание: числитель – пределы варьирования, знаменатель – среднее значение
Note: the numerator is the range of variation, the denominator is the average value

Ранее в ходе мониторинга снежного покрова Сибири по данным радиометра MODIS величины NDSI менее 0,53 были отнесены к категории «грязного» снега [29]. Известно, что снежный покров имеет значения $NDSI > 0,4$ [38]. Как в городе, так и на фоновой территории отмечены значения $< 0,4$. Если в городе это связано с уборкой снега, то вне его значения $< 0,4$ отмечены на участках, покрытых лесной растительностью. Таким образом, наличие растительного покрова и уборка улиц существенно влияют на NDSI и обуславливают его малопригодность для оценки количества поступающих пылеаэрозолей.

Значения индекса S3, уменьшающего влияние растительного покрова, на фоновых участках и в городе, различаются почти в 2 раза. Сходным образом двукратное различие показал индекс загрязнения SCI (табл. 2). По критерию Манна-Уитни на территории города средние значения индексов S3 и SCI достоверно отличаются от фоновой территории с высокой степенью достоверности ($p < 0,01$), что подтверждает их индикаторную роль для оценки уровня загрязнения снега. Различия по величине индекса NDSI не отмечены.

Величина пылевой нагрузки достоверно коррелирует с индексом S3, однако отличается слабая зависимость ($r = -0,40$) (табл. 3). Величина рН в наибольшей степени связана зависимостью со значениями индекса SCI ($r = -0,39$). Относительно низкие, хотя и статистически достоверные значения коэффициентов корреляции, вероятно, связаны с разным размером площадок опробования (5×5м) и площади пиксела на космоснимке (30×30 м). Попадание на пиксел расчищенных участков, дорог с удаленным снежным покровом после использования реагентов влияет на значение снеговых индексов и вызывает несоответствие между показателями пылевой нагрузки и снеговыми индексами. От плотности снега, высоты снежного покрова, минерализации электропроводности талых вод индексы не зависят. Ранее при анализе притока пылеаэрозоля в Нижнеарттовске также было отмечено, что лучше всего индицирует пылевую нагрузку нормированный индекс снега S3, а

Экология и природопользование
Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

величину рН – индекс загрязнения снега SCI [21]. Таким образом, снеговые индексы характеризуют важные для геоэкологической оценки параметры снежного покрова – количество пылевых включений и кислотно-щелочные условия. Наличие достоверных корреляционных связей дает возможность использовать снеговые индексы для оценки интенсивности загрязнения.

Таблица 3

Коэффициенты ранговой корреляции между снеговыми индексами физическими и физико-химическими характеристиками снежного покрова
Coefficients of rank correlation between snow indices and physical and physico-chemical characteristics of snow cover

Показатель	SCI	NDSI	S3	Пыль	рН	Минерализация	Плотность снега	Высота покрова
SCI	1,00	-0,02	0,47	-0,32	-0,39	-0,19	-0,18	-0,09
NDSI	-	1,00	0,05	-0,02	-0,02	0,00	-0,28	0,00
S3	-	-	1,00	-0,40	-0,29	-0,13	-0,15	0,03
Пыль	-	-	-	1,00	0,53	0,40	0,09	-0,04
рН	-	-	-	-	1,00	0,80	0,07	0,04
Минерализация	-	-	-	-	-	1,00	0,01	0,01
Плотность снега	-	-	-	-	-	-	1,00	-0,09
Высота покрова	-	-	-	-	-	-	-	1,00

Примечание: выделены значения с достоверной связью – $p < 0,05$

Note: highlighted are the values with reliable relationship – $p < 0,05$

Наблюдаются различия снеговых индексов в различных функциональных зонах Тобольска, как и на фоновых участках с разным типом растительности. Величина индекса S3 уменьшается в ряду: лес – кустарниковые сообщества – пригород с малоэтажной коттеджной застройкой, зона одноэтажной застройки – открытые фоновые участки – промзона, зона многоэтажной застройки – исторический центр (рис. 3). Индекс SCI также показывает значительные различия между фоновыми участками и городской территорией, в пределах которой различия между функциональными зонами невелики, за исключением исторического центра, где значения минимальны.

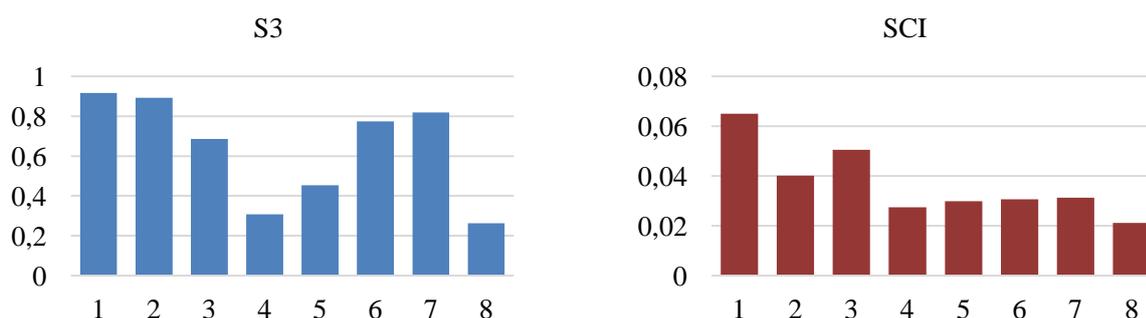


Рис. 3. Значения снеговых индексов в различных функциональных зонах города и разных типах растительности фоновых участков:

1–3 – фоновые участки: 1 – лес, 2 – кустарники, 3 – открытый участок (поле), 4–8 – город (4 – зона многоэтажной застройки, 5 – промзона, 6 – зона одноэтажной застройки, 7 – пригород с малоэтажной застройкой, 8 – исторический центр)

(составлено авторами по результатам обработки космической съёмки 2020 г.)

Fig. 3. Snow index values in different functional areas of the city and different types of vegetation in the background areas.

1–3 – background areas: 1 – forest, 2 – shrubs, 3 – open area (field), 4–8 – city (4 – multi-storey development zone, 5 – industrial zone, 6 – single-storey development zone, 7 – suburb with low-rise buildings, 8 – historical center)
(compiled by the authors on the results of processing satellite images in 2020)

Экология и природопользование
Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

Отличие спектральной яркости чистого и загрязнённого снега наглядно демонстрируют кривые, построенные по снимку Landsat 8. Для площадки отбора с высоким уровнем загрязнения (город) характерны пониженные значения практически по всему спектру (рис. 4). Исключение составляют каналы SWIR 1 (1,56-1,66 мкм) и SWIR 2 (2,10-2,30 мкм), где спектральная кривая снега с высоким содержанием пыли почти совпадает со значениями яркости чистого снежного покрова, отобранного на фоновом участке.

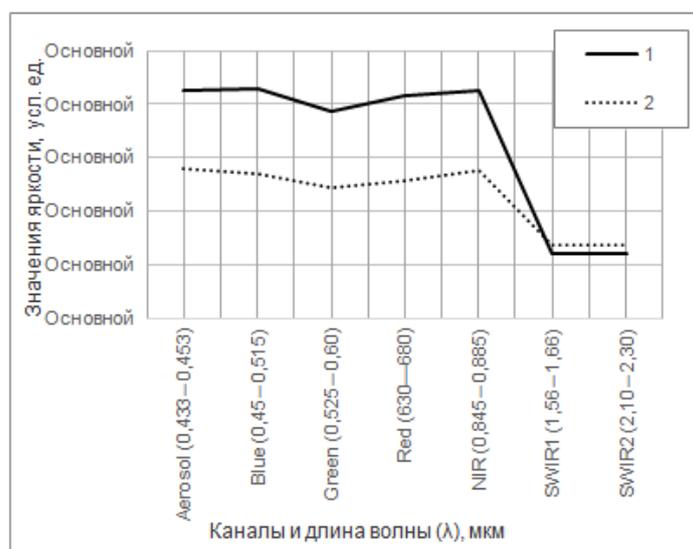


Рис.4. Кривые спектральной отражательной способности чистого и загрязненного снежного покрова, построенные по снимку Landsat-8 (составлено авторами по полевым материалам 2020 г.):

1 – чистый снег, фоновый участок (поле), 2 – загрязненный снег, город

Fig. 4. Spectral reflectivity curves of clean and polluted snow cover based on Landsat-8 image (compiled by the authors on the results of processing satellite images in 2020)

1 – Clear snow, background area (field), 2 – Polluted snow, city

Выводы.

Тобольск – город с умеренным потоком атмосферных пылевых выпадений. Средняя величина пылевой нагрузки на фоновой территории составляет $4,0 \text{ мг/м}^2$ в сутки, в городе – $32,1 \text{ мг/м}^2$ в сутки, что соответствует данным, полученным на других городах с умеренным уровнем воздействия. Максимальное значение притока пылеаэрозолей (406 мг/м^2 в сутки) и минерализации снеготалых вод было выявлено вблизи автотрассы, соединяющей городскую застройку с промзоной, где поток автотранспорта максимален. Наблюдается умеренное подщелачивание снежного покрова, средняя величина рН выросла с 5,1 до 6,0 единиц. Промышленная зона Тобольска является относительно «чистой», превышения запыления по сравнению с зонам жилой застройки не отмечено. Вычисленные снеговые индексы показали разную применимость для анализа уровня запыления снежного покрова. Информативность нормализованного разностного индекса снега NDSI была низкой, не выявлено достоверных различия между фоновыми участками и городской территорией. Нормированный индекс снега S3 и индекс загрязнения снега SCI более подходят для оценки притока пылеаэрозолей и изменения рН. Средние значения индексов на фоновых и городских участках достоверно различаются, существует корреляционная зависимость между количеством нерастворимых частиц в снеге и индексом S3, между рН и индексом SCI. Указанные индексы могут быть использованы для анализа запыления атмосферного воздуха.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-50062\19.

The work was supported by the RFBR grant 19-05-50062\19.

Экология и природопользование
Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

Библиографический список

1. Алексеев В.Р. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения земель // Лёд и Снег. 2013. № 1(121). С. 127–140.
2. Архив погоды в Тюмени. Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: <https://rt5.ru/> (дата обращения: 08.10.2020).
3. Битюкова В.Р., Касимов Н.С., Власов Д.В. Экологический портрет российских городов // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 6–18.
4. Боев В.А., Лежнина А.А. Тяжёлые металлы в снежном покрове Тюменского района Тюменской области // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2012. № 7. С. 41–48.
5. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
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. Т. 12. № 2. С. 50–60.
7. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 181 с.
8. Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование Тюменской области. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 246 с.
9. Дорожкува С.Л. Эколого-геохимические особенности нефтегазодобывающих районов Тюменской области: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004. 25 с.
10. Ермолов Ю.В., Смоленцев Н.Б. Зимний фоновый сток примесей атмосферы на юго-востоке Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 1(372). С. 75–81. doi: 10.15372/AOO20200111.
11. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.
12. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестник Московского ун-та. Сер. 5, геогр. 2012. № 4. С. 14–24.
13. Лагутин А.А., Суторихин И.А., Синицин В.В., Жуков А.П., Шмаков И.А. Мониторинг крупных промышленных центров юга Западной Сибири с использованием данных MODIS и наземных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 1. С. 60–66.
14. Литая В.В., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Лончакова А.Д., Третьякова М.И. Оценка пылевого загрязнения атмосферы г. Омска по данным снеговой съёмки // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 3. С. 256–259.
15. Московченко Д.В. Нефтегазодобыча и окружающая среда: эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск: Наука. 1998. 112 с.
16. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Особенности формирования химического состава снегового покрова на территории Ханты-Мансийского автономного округа // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. №1. С. 71–81.
17. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 2. Многолетние данные. Вып.17. Тюменская и Омская области. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. 702 с.
18. 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. Т. 21. № 6. С. 1025–1037.
19. Официальный сайт администрации города Тобольска. Социально-экономическое развитие города. [Электронный ресурс]. URL: <http://admtobolsk.ru/econom/price/> (дата обращения: 08.10.2020).
20. Пожитков Р.Ю., Московченко Д.В., Кудрявцев А.А. Геохимия снежного покрова г. Нижневартовска // Вестник Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2018. Т. 4. № 1. С. 6–24.
21. 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 атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 10 (381). С. 767–773.
22. Правительство Тюменской области. Доклад об экологической ситуации в Тюменской области в 2017 году [Электронный ресурс]. URL: https://admtumen.ru/ogv_ru/about/ecology/eco_monitoring/environment.htm (дата обращения: 08.10.2020).
23. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Загрязнение земли по районам, городским поселениям и в речных водосборах. Уральский Федеральный округ России. СПб.: Недра, 2007. 110 с.
24. Рупута В.Ф., Ярославцева Т.В. Наземный и спутниковый мониторинг загрязнения снежного покрова города в оценке состояния здоровья населения // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 4. № 1. С. 32–36.
25. Ревич Б.А., Саев Ю.Е., Смирнова Р.С., Сорокина Е.П. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами. М.: ИМГРЭ, 1982. 112 с.

Экология и природопользование

Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

26. Савичев О.Г. Условия формирования ионного стока в бассейне Средней Оби // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 2. С. 54–58
27. Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
28. Свистов П.Ф., Полищук А.И. Атмосферные осадки над городами и регионами России // Природа. 2014. № 3(1183). С. 28–36.
29. Сухинин А.И., Воробьева М.В., Охоткина Е.А. Космический мониторинг снегового покрова Сибири по данным радиометра MODIS // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2011. № 4(37). С. 90–96.
30. Таловская А.В., Филимонок Е.А., Язиков Е.Г. Динамика элементного состава снегового покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 6. С. 491–495.
31. Факащук Н.Ю., Соромотин А.В. Оценка состояния снежного покрова и почв Тобольской промзоны // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2017. Т. 3. № 2. С. 22–33. doi: 10.21684/2411-7927-2017-3-2-22-33.
32. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р., Горюнова Н.В., Кловиткин А.А., Кравчишина М.Д., Кривс М., Новигатский А.Н., Соколов В.Т., Филиппов А.С., Хаас Х. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 1(75). С. 106–118.
33. Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 336 с.
34. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв: монография. Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2010. 264 с.
35. Ярославцева Т.В., Рапуга В.Ф. Использование космоснимков и наземных наблюдений для анализа полей длительного загрязнения снежного покрова города // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 4. № 1. С. 50–54.
36. Dozier J. Snow reflectance from Landsat-4 thematic mapper // IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing. 1984. Vol. 3. Pp. 323–328.
37. Dozier J., Schneider S.R., McGinnis D.F., Jr. Effect of grain size and snowpack water equivalence on visible and near-infrared satellite observations of snow // Water Resources Res. 1981. Vol. 17. Pp. 1213–1223.
38. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data // Remote Sensing Env. 1995. Vol. 54. Pp. 127–140.
39. Negi H.S., Kulkarni A.V., Semwal B.S. Study of contaminated and mixed objects snow reflectance in Indian Himalaya using spectroradiometer // Int J Remote Sens. 2009. Vol. 30, № 2. Pp 315–325.
40. Negi H.S., Singh S.K., Kulkarni A.V. et al. Field-based spectral reflectance measurements of seasonal snow cover in the Indian Himalaya // Int J Remote Sens. 2010. Vol. 31. № 9. Pp. 2393–2417.
41. Saito A., Yamazaki T. Characteristics of spectral reflectances for vegetation ground surfaces with snow cover: vegetation indices and snow indices // J Japan Soc Hydrol Water Resour. 1999. Vol. 12. Pp. 28–38.
42. U.S. Geological Survey. [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 09.10.2020).
43. Warren S.G. Impurities in snow: Effects on albedo and snowmelt // Annals of Glaciology. 1984. Vol. 5. P. 177–179.

References

1. Alekseev, V.R. (2013), “Snow cover as an indicator of cumulative land pollution”, *Led i Sneg*, vol. 121, no. 1, pp. 127–140.
2. Archive of weather in Tyumen, “*Weather schedule*”, available at: <https://rt5.ru/> (Accessed 08 October 2020).
3. Bityukova, V.R., Kasimov, V.S. and Vlasov, D.V. (2011), “Environmental portrait of Russian cities”, *Ekologia i promyslennost Rossii*, no. 4, pp. 6–18.
4. Boev, V.A., Lezhnina, A.A. (2012), “Heavy metals in the snow cover of the Tyumen district of the Tyumen region”, *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodnopol'zovanie*, no. 7, pp. 41–48.
5. Bondur, V.G. (2010), “Aerospace methods and technologies for monitoring oil and gas-bearing territories and objects of the oil and gas complex”, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, no. 6, pp. 3–17.
6. Vasilevich, M.I., Shchanov, V.M. and Vasilevich, R.S. (2015), “Application of satellite research methods to assess snow cover pollution around industrial enterprises in the tundra zone”, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 12, no. 2, pp. 50–60.
7. Vasilenko, V.N., Nazarov, I.M. and Fridman, Sh.D. (1985), *Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova* [Monitoring of snow cover pollution], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia.
8. Gvozdeckij, N.A. (1973), *Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie Tyumenskoj oblasti* [Physical and geographical zoning of the Tyumen region], Moscow University Press, Moscow, Russia.
9. Dorozhukova, S.L. (2004), *Ecological and geochemical features of oil and gas producing areas of the Tyumen region*, Abstract of Ph.D. dissertation, Earth and related environmental sciences, Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Moscow, Russia.

Экология и природопользование

Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

10. Ermolov, Yu.V. and Smolencev, N.B. (2020), “Winter background runoff of atmospheric impurities in the south-east of Western Siberia”, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 33, no. 1, pp. 75–81. doi: 10.15372/AOO20200111.
11. Kasimov, N.S., Vlasov, D.V., Kosheleva, N.E. and Nikiforova, E.M. (2016), *Geohimiya landshaftov Vostochnoj Moskvy* [Geochemistry of landscapes of Eastern Moscow], APR, Moscow, Russia.
12. Kasimov, N.C., Kosheleva, N.E., Vlasov, D.V. and Terskaya, E.V. (2012), “Geochemistry of snow cover in the Eastern district of Moscow”, *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, no. 4, pp. 14–24.
13. Lagutin, A.A., Sutorihin, I.A., Sinicin, V.V., Zhukov, A.P. and Shmakov, I.A. (2011), “Monitoring of large industrial centers in the South of Western Siberia using MODIS data and ground-based observations”, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 24, no. 1, pp. 60–66.
14. Litau, V.V., Talovskaya, A.V., Yazikov, E.G., Lonchakova, A.D. and Tret'yakova, M.I. (2015), “Assessment of dust pollution of the atmosphere of Omsk according to snow survey data”, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 28, no. 3, pp. 253–269.
15. Moskovchenko, D.V. (1998), *Neftegazodobycha i okruzhayushchaya sreda: ekologo-geohimicheskij analiz Tyumenskoj oblasti* [Oil and gas production and the environment: ecological and geochemical analysis of the Tyumen region], Nauka, Novosibirsk, Russia.
16. Moskovchenko, D.V. and Babushkin, A.G. (2012), “Peculiarities of formation of chemical composition of snow waters (on example of Khanty-Mansi autonomous district)”, *Earth's Cryosphere*, vol. 16, no. 1, pp. 71–81.
17. *Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 2. Mnogoletnie dannye. Vyp.17. Tyumenskaya i Omskaya oblasti* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR, Series 2, Tyumen and Omsk regions, Long-term data, vol. 17] (1998), Gidrometeoizdat, Saint Petersburg, Russia.
18. Onuchin, A.A., Burenina, T.A., Zubareva, O.N., Trefilova, O.V. and Danilova, I.V. (2014), “Pollution of snow cover in the impact zone of enterprises in Norilsk Industrial Area”, *Sibirskiy Ekologicheskij Zhurnal*, vol. 21, no. 6, pp. 1025–1037. doi: 10.1134/S1995425514060080.
19. Official website of the administration of the city of Tobolsk (2020), “Socio-economic development of the city”, available at: <http://admtobolsk.ru/econom/price/> (Accessed 08 October 2020).
20. Pozhitkov, R.Yu., Moskovchenko, D.V. and Kudryavtsev, A.A. (2018), “The Geochemistry of Snow Cover in Nizhnevartovsk”, *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, vol. 4, no. 1, pp. 6–24.
21. Pozhitkov, R.Yu., Tigeev, A.A. and Moskovchenko, D.V. (2020), “Assessment of dust fallout in the snow cover using remote sensing data: the case of Nizhnevartovsk”, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 33, no. 10(381), pp. 767–773.
22. Official website of the Authorities of the Tyumen Region (2018), “Reports on the environmental situation in the Tyumen Region for 2017”, available at: <http://правительство.янао.рф/region/ecology> (Accessed 08 October 2020).
23. Prokacheva, V.G. and Usachev, V.F. (2007), *Zagryaznenie zemli po rajonom, gorodskim poseleniyam i v rechnyh vodosborah. Ural'skij Federal'nyj okrug Rossii*. [Land pollution by districts, urban settlements, and river catchments. Ural Federal District of Russia], Nedra, Saint Petersburg, Russia.
24. Raputa, V.F. and Yaroslavceva, T.V. (2017), “Terrestrial and satellite monitoring of snow cover pollution of cities to assess the health status of population”, *Interespo Geo-Sibir*, vol. 4, no 1, pp. 32–36.
25. Revich, B.A., Saet, Yu.E., Smirnova, R.S. and Sorokina, E.P. (1982), *Metodicheskie rekomendacii po geohimicheskoy ocenke zagryazneniya territorii gorodov himicheskimi elementami* [Methodological recommendations for the geochemical assessment of urban pollution with chemical elements], IMGRE, Moscow, Russia.
26. Savichev, O.G. (2005), “Conditions for the formation of ion runoff in the Middle Ob basin”, *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, vol. 308, no 2, pp. 54–58.
27. Saet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P. et al. (1990), *Geohimiya okruzhayushchej sredy* [Geochemistry of the environment], Nedra, Moscow, Russia.
28. Svistov, P.F., Polishchuk, A.I. (2014), “Atmospheric Precipitations over Russian Cities and Regions”, *Priroda*, no 3(1183), pp. 28–36.
29. Suhinin, A.I., Vorob'eva, M.V. and Ohotkina, E.A. (2011), “Remote sensing of snow cover in siberia on data of radiometer MODIS”, *Vestnik Sibirskogo gos. aerokosmicheskogo un-ta im. akad. M.F. Reshetneva*, no 4(37), pp. 90–96.
30. Talovskaya, A.V., Filimonenko, E.A. and Yazikov, E.G. (2014), “Dynamics of the elemental composition of the snow cover in the north-eastern zone of influence of Tomsk-Seversk industrial agglomeration”, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 27, no. 6, pp. 491–495.
31. Fakashchuk, N.Yu. and Soromotin, A.V. (2017), “Environmental Assessment of the Tobolsk Industrial Zone Territory”, *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodnopol'zovanie*, vol. 3, no. 2, pp. 22–33. doi: 10.21684/2411-7927-2017-3-2-22-33.

Экология и природопользование

Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю.

32. Shevchenko, V.P., Lisicyan, A.P., Shtajin, R., Goryunova, N.V., Klyuvitkin, A.A., Kravchishina, M.D., Krivs, M., Novigatskiy, A.N., Sokolov, V.T., Filippov, A.S. and Haas, H. (2007), "Distribution and composition of insoluble particles in Arctic snow", *Problemy Arktiki i Antarktiki*, no. 1(75), pp. 106–118.
33. Kasimov, N.S. (ed.) (1995), *Ekogeohimiya gorodskih landshaftov* [Ecogeochemistry of urban landscapes], Moscow University Press, Moscow, Russia.
34. Yazikov, E.G., Talovskaya, A.V. and Zhornyak, L.V. (2010), *Ocenka ekologo-geohimicheskogo sostoyaniya territorii g. Tomsk po dannym izucheniya pyleaerozolej i pochv* [Assessment of the ecological and geochemical state of the territory of Tomsk according to the data of the study of dust aerosols and soils], Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Tomsk, Russia.
35. Yaroslavceva, T.V. and Raputa, V.F. (2016), "The use of satellite images and ground observations for the analysis of fields of long-term pollution of the snow cover of the city", *Interesko Geo-Sibir*, vol. 4, no 1, pp. 60–64.
36. Dozier, J (1984), "Snow reflectance from Landsat-4 thematic mapper", *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, vol. 3, pp. 323–328.
37. Dozier, J., Schneider, S.R. and McGinnis, D.F (1981), "Effect of grain size and snowpack water equivalence on visible and near-infrared satellite observations of snow", *Water Resources Res*, vol.17, pp. 1213–1223.
38. Hall, D.K., Riggs, G.A. and Salomonson, V.V (1995), "Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data", *Remote Sensing Env*, vol. 54, pp. 127–140.
39. Negi, H.S., Kulkarni, A.V. and Semwal, B.S (2009), "Study of contaminated and mixed objects snow reflectance in Indian Himalaya using spectroradiometer", *Int J Remote Sens*, vol. 30, no 2, pp. 315–325.
40. Negi, H.S, Singh, S.K, Kulkarni, A.V. et al. (2010), "Field-based spectral reflectance measurements of seasonal snow cover in the Indian Himalaya", *Int J Remote Sens*, vol. 31, no 9, pp. 2393–2417.
41. Saito, A., Yamazaki, T (1999), "Characteristics of spectral reflectances for vegetation ground surfaces with snow cover: vegetation indices and snow indices", *J Japan Soc Hydrol Water Resour*, vol. 12, pp.28–38.
42. U.S. Geological Survey, available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Accessed 09 October 2020).
43. Warren, S.G (1984), "Impurities in snow: Effects on albedo and snowmelt", *Annals of Glaciology*, vol. 5, pp. 177–179.

Поступила в редакцию: 31.03.2021

Сведения об авторах

About the authors

Александр Анатольевич Тигеев

кандидат географических наук, научный сотрудник,
Тюменский научный центр СО РАН;
Россия, г. Тюмень

Alexander A. Tigeev

Candidate of Geographical Sciences, Research Officer,
Tyumen scientific center SB RAS, Tyumen

e-mail: ttrruubbaa@mail.ru

Николай Владиславович Аксёнов

магистрант, Тюменский государственный
университет;
Россия, г. Тюмень

Nikolay V. Aksenov

Master student, Tyumen State University, Tyumen

e-mail: aksenov7242@gmail.com

Дмитрий Валерьевич Московченко

доктор географических наук, ведущий научный
сотрудник, Тюменский научный центр СО РАН;
Россия, г. Тюмень

Dmitriy V. Moskovchenko

Doctor of Geographical Sciences, leading researcher,
Tyumen scientific center SB RAS, Tyumen

e-mail: moskovchenko@hotmail.ru

Роман Юрьевич Пожитков

младший научный сотрудник, Тюменский научный
центр СО РАН;
Россия, г. Тюмень

Roman Yu. Pozhitkov

Research Assistant, Tyumen scientific center SB RAS,
Tyumen

e-mail: pozhitkov-roma@yandex.ru

Пробьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Тигеев А.А., Аксёнов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю. Оценка пылевого загрязнения атмосферы наземными и дистанционными методами (на примере г. Тобольск) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. №2(57). С. 121–134. doi: 10.17072/2079-7877-2021-2-121-134.

Please cite this article in English as:

Tigeev, A.A., Aksenov, N.V., Moskovchenko, D.V., Pozhitkov, R.Yu. (2021). Assessment of atmospheric dust contamination with ground-based and remote sensing methods (on the example of the town of Tobolsk). *Geographical bulletin*. No. 2(57). Pp. 121–134. doi: 10.17072/2079-7877-2021-2-121-134.