

УДК 504.3.064.3

## Исследование загрязнения взвешенными частицами $PM_{2,5}$ и $PM_{10}$ приземного слоя атмосферного воздуха и снежного покрова г. Сургут с использованием спектральных индексов

А. А. Тигеев

*Институт проблем освоения Севера Тюменского научного центра  
Сибирского отделения РАН, г. Тюмень, Россия;  
e-mail: ttrruubbaa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>*

*Информация о статье* Реферат

Поступила  
в редакцию  
05.12.2025;

получена  
после доработки  
05.02.2026;

принята  
к публикации  
05.02.2026

*Ключевые слова:*

аэрозоли,  
функциональные зоны,  
пылевые частицы,  
снежный покров,  
снеговые индексы

*Для цитирования*

Пылевые частицы  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ , поступающие в атмосферный воздух и проникающие в организм в процессе дыхания, представляют опасность для здоровья человека. Настоящая работа направлена на решение задачи определения количества мелкодисперсных частиц в приземном слое воздуха в разных функциональных зонах г. Сургут (Тюменская область) и оценку возможной взаимосвязи содержания  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  со спектральными характеристиками снежного покрова. Автором выполнены измерения концентрации пылевых частиц в приземном слое атмосферного воздуха, определены спектральные характеристики снегового покрова с использованием спутниковых данных, рассчитаны индексы снега. На основании дифференциации по функциональным зонам города на основе снеговых индексов выявлено, что в общественно-деловой и промышленной зонах снег загрязнен в большей степени. Это объясняется высокой интенсивностью автотранспорта и влиянием промышленных предприятий. Именно в этих зонах определена наибольшая концентрация взвешенных частиц.

Тигеев А. А. Исследование загрязнения взвешенными частицами  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  приземного слоя атмосферного воздуха и снежного покрова г. Сургут с использованием спектральных индексов. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-64-74>.

## Study of the ground-level by $PM_{2,5}$ and $PM_{10}$ suspended particles atmospheric air pollution and snow cover in Surgut using spectral indices

Alexander A. Tigeev

*Institute of the Problems of Northern Development, Tyumen Scientific Center  
of the Siberian Branch of RAS, Tyumen, Russia;  
e-mail: ttrruubbaa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>*

*Article info*

Received  
05.12.2025;

received  
in revised form  
05.02.2026;

accepted  
05.02.2026

*Key words:*

aerosols,  
functional zones,  
dust particles,  
snow cover,  
snow indices

*For citation*

*Abstract*

$PM_{2,5}$  and  $PM_{10}$  dust particles, which enter the atmosphere and penetrate the body through inhalation, pose a health hazard. This study aims to determine the amount of fine particles in the ground-level air in different functional zones of Surgut (Tyumen region) and to assess the possible relationship between  $PM_{2,5}$  and  $PM_{10}$  levels and the spectral characteristics of snow cover. The author has measured the concentration of dust particles in the ground-level air, determined the spectral characteristics of snow cover using satellite data, and calculated indices. Based on the snow indices used to differentiate the city's functional zones, it has been found that snow is more polluted in the public, business, and industrial zones. This is explained by the high traffic intensity and the influence of industrial enterprises. It is in these zones that the highest concentration of suspended particles is determined.

Tigeev, A. A. 2026. Study of the ground-level by  $PM_{2,5}$  and  $PM_{10}$  suspended particles atmospheric air pollution and snow cover in Surgut using spectral indices. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 64–74. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-64-74>.

## Введение

В Ханты-Мансийском автономном округе (Тюменская область) сезон с минусовыми температурами длится в среднем 7–8 месяцев. Это является причиной выбора снежного покрова и его сорбционных свойств в качестве объекта изучения. Снеговые кристаллы поглощают мелкие частицы (ядра кристаллизации) уже в процессе своего образования. При выпадении снега также происходит захват и осаждение аэрозольных элементов (Алексеев, 2013). В результате снеготалые воды содержат больше как растворенных, так и взвешенных веществ, чем дождевая вода. По показателям загрязнения снега можно определить количество загрязняющих веществ, поступающих в почвы и поверхностные воды во время снеготаяния (Экогеохимия, 1995). Поллютантов в пылевых выпадениях до 90 % и более концентрируется в твердой фазе, в то время как жидкая составляет не более 10 % (Касимов и др., 2012).

Актуальность мониторинга приземного слоя атмосферы городских территорий растет вместе с числом объектов промышленности, численностью населения и интенсивностью дорожного движения. Пылевые частицы адсорбируют из воздуха токсичные вещества, которые вместе с ними могут попадать в организм человека, вызывая ряд заболеваний или обостряя уже имеющиеся (Reche et al., 2012). Мелкодисперсные частицы  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  (от 2,5 до 10 микрометров), поступающие в атмосферный воздух и попадающие затем в человеческий организм, являются особенно опасными для здоровья из-за своих физических свойств. Чем меньше размер, тем выше их возможности проникать в организм вместе с токсичными веществами, адсорбируемыми из воздуха, вызывая негативные последствия для здоровья людей. В настоящее время исследование распределения мелкодисперсных взвешенных частиц в атмосферном воздухе активно проводится во всем мире (Janssen et al., 2013; Sicard et al., 2019), особенно в Азии, что обусловлено высокими темпами экономического развития этого региона мира (Maji et al., 2017; Karimian et al., 2016). В России данной проблеме также уделяется большое внимание. Исследуется концентрация  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  в приземном слое атмосферы урбанизированных территорий, их источники и влияние на здоровье человека (Тунакова и др., 2018; Боровлев, 2020; Pozhitkov et al., 2021; Май и др., 2024).

Сургут расположен в пределах Западно-Сибирской равнины, на правом берегу реки Обь. Площадь города – 353 км<sup>2</sup>. Сроки установления снежного покрова для Западной Сибири в районе Сургута – 31.10–07.11. Даты схода снежного покрова в период 2000–2015 гг. – 30.04–07.05. По данным дистанционного зондирования Земли, наблюдается тенденция к снижению продолжительности залегания снежного покрова в районе исследования, которая обусловлена как значимым уменьшением зимних осадков, так и более ранним началом весны (Титкова и др., 2017). К основным источникам загрязнения атмосферы в Сургуте можно отнести ГРЭС-1 и ГРЭС-2, котельные, хранилища песка и гравия. Существенный вклад в отрицательное влияние на воздушную среду города вносят автотранспорт и добыча углеводородного сырья в Сургутском районе. Среди функциональных городских зон выделяют участки, относящиеся к производственной, энергетической, общественно-деловой и жилой зонам<sup>1</sup>. Пылеаэрозоли, попадая на снежный покров, заметно трансформируют его спектральные параметры в сравнении с только выпавшим снегом. Это дает возможность комплексного использования спутниковых данных и полевых исследований.

Целью работы является определение пространственной локализации участков загрязнения различных функциональных зон г. Сургута минеральными пылевыми частицами.

## Материалы и методы

Замеры разовых концентраций мелкодисперсной пыли проводились как в самом г. Сургут, так и на фоновой территории в третьей декаде марта. Чтобы минимизировать погрешность, замеры проводились три раза для каждой точки с определением среднего. Все точки сведены в единую таблицу, с указанием координат и приуроченности к различным функциональным зонам города (последнее послужило основанием выбора мест пробоотбора) (табл. 1). В Северном промышленном районе (один из пяти административных районов, выделенный на рис. 3 серым цветом) было произведено 6 замеров. Район включает в себя несколько предприятий (Мостоотряд-29, Сургутское производственное объединение пассажирского автотранспорта, склады хранения сыпучих материалов и ряд других). Все они являются источниками пылевых частиц. Концентрация взвешенных частиц определена для шести фоновых точек в различных ландшафтных условиях на расстоянии не менее 0,5 км от автотрассы. В городе проведены измерения для двадцати пяти точек (рис. 1) в разных функциональных зонах с использованием мобильного датчика взвешенных частиц AIR TESTER CW-NAT 200. Замер производился на высоте 165 см, что примерно соответствует расстоянию органов дыхания человека от поверхности.

<sup>1</sup> Территориальные зоны г. Сургут. Официальный портал Администрации города Сургута [Электронный ресурс]. URL: <https://dumasurgut.ru/getattachment/e780bb9e-e071-4f82-ba38-c82bd68f1746/18660.jpeg/> (дата обращения: 22.04.2025).

Использованный способ определения концентрации мелкодисперсных частиц регистрирует оптическое излучение. Взвешенные частицы в измерительной камере рассеивают оптический луч лазерного диода, который, в свою очередь, регистрируется фотоприемником. Массовая концентрация аэрозольных частиц в данном случае прямо пропорциональна значению излучения. Количественно и пространственно PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> отражены на схемах, построенных с использованием оболочки MapInfo 15.0, где диапазон содержания частиц показан значками различного размера методом равного разброса значений.

Таблица 1. Сводная таблица по точкам отбора проб  
Table 1. Summary table by sampling points

Номер точки	Координаты	Функциональная зона
Сф1	61,544222; 72,735333	Фон
Сф2	61,597516; 72,582393	Фон
Сф3	61,613457; 72,479826	Фон
Сф4	61,616889; 72,481407	Фон
Сф5	61,596775; 72,581806	Фон
Сф6	61,582111; 72,653139	Фон
1	61,285056; 73,381167	Промзона
2	61,287333; 73,3935	Промзона
3	61,276222; 73,404833	Промзона
4	61,27125; 73,425833	Промзона
5	61,281306; 73,435944	Промзона
6	61,273667; 73,385833	Промзона
7	61,25875; 73,367833	Жилая многоэтажная
8	61,275778; 73,482667	Зона энергетики
9	61,276333; 73,501917	Зона энергетики
10	61,279278; 73,521	Зона энергетики
11	61,237222; 73,483083	Жилая одноэтажная
12	61,236417; 73,474639	Жилая одноэтажная
13	61,240111; 73,473972	Жилая одноэтажная
14	61,238194; 73,457639	Жилая многоэтажная
15	61,236139; 73,441528	Жилая одноэтажная
16	61,240972; 73,407917	Общественно-деловая
17	61,241; 73,392389	Общественно-деловая
18	61,237333; 73,374778	Общественно-деловая
19	61,251056; 73,376444	Жилая многоэтажная
20	61,253472; 73,391667	Жилая многоэтажная
21	61,25; 73,418194	Жилая многоэтажная
22	61,261944; 73,413694	Жилая многоэтажная
23	61,265917; 73,376056	Жилая многоэтажная
24	61,338389; 73,410583	Зона транспорта
25	61,288972; 73,322556	Общественно-деловая

Чтобы наиболее полно оценить уровень концентрации в приземном слое атмосферы пылеаэрозолей и загрязнения ими снега, было принято во внимание свойство мелкодисперсных взвешенных частиц изменять альбедо. Индекс NDSI (Normalized Difference Snow Index) с показателем выше 0,4 регистрирует наличие снегового покрова (покрытие снегом более чем наполовину) (Hall et al., 1995). В качестве материала для оценки загрязнения снежного покрова использовался мультиспектральный спутниковый снимок Landsat 8 (сенсор OLI), сделанный в период полевого опробования (29 марта 2021 г.). Следует отметить, что использование космоснимков спутников Landsat (пространственное разрешение здесь составляет 30 м) видится весьма оправданным именно для урбанизированных территорий. Применяемые в большинстве исследований сканирующие спектро радиометры среднего разрешения MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) не позволяют получать достаточно детальную информацию для мониторинга снежного покрова в горах.

Для определения уровня взаимосвязи спектральных характеристик снега с интенсивностью осадения на него аэрозолей, помимо часто применяемого в исследованиях подобного рода индекса NDSI, были получены значения нормированного индекса снега S3 и индекса загрязнения SCI. Снеговой индекс S3

был использован в дополнение к NDSI, исходя из того, что данный показатель учитывает характеристики как снега, так и растительности, позволяя определять заснеженные участки в совокупности с теми, что закрыты растительным покровом (Kour et al., 2016). Снег идентифицируется при значении показателя более 0,18. Наличие снега под растительностью отмечается при диапазоне значений 0,05 до 0,18, величины ниже 0,05 указывают на отсутствие снежного покрова (Shimamura et al., 2006).

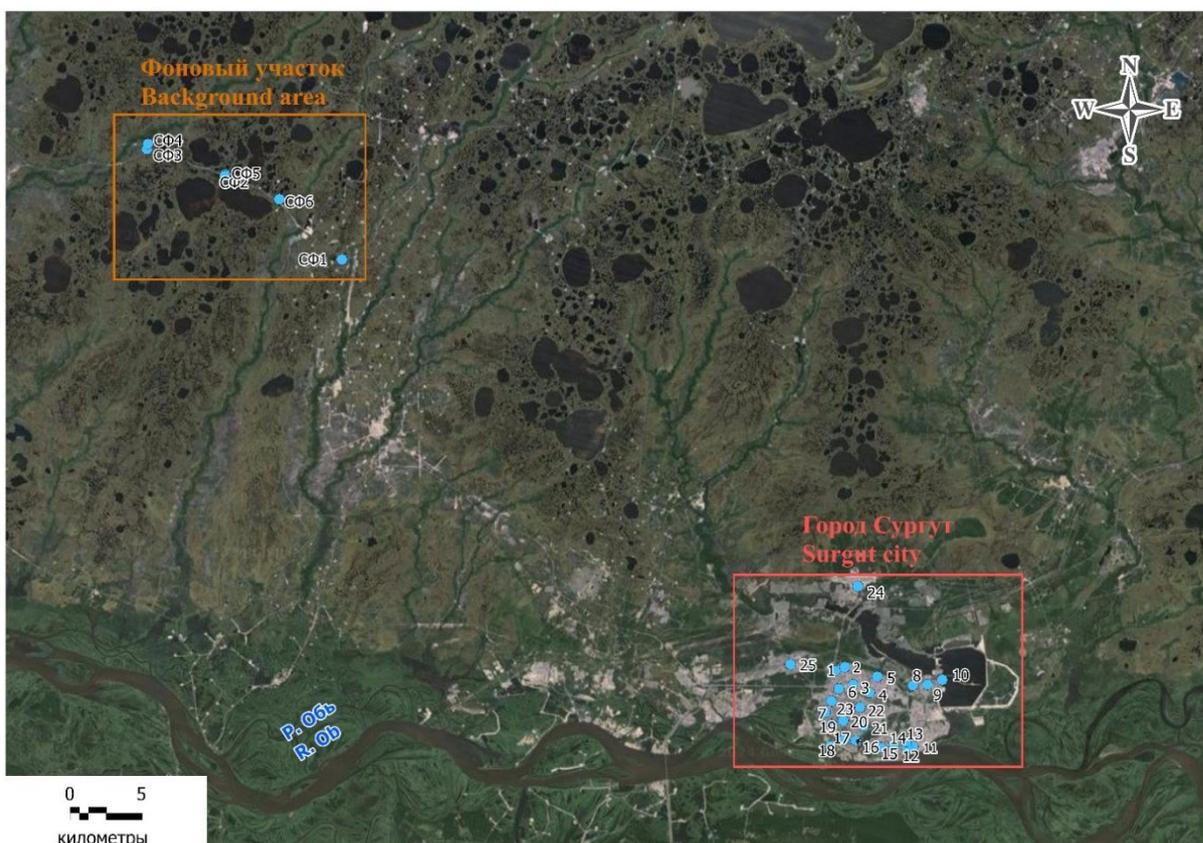


Рис. 1. Расположение исследуемых участков – г. Сургут и условно-фоновая территория  
Fig. 1. Location of the plots to be studied – Surgut and conditional-background territory

Загрязнение снежного покрова твердыми частицами отражается в видимой области спектра, уменьшаясь с увеличением длины волны. В ближнем инфракрасном спектре роль загрязнения невелика. В соответствии с этим был использован индекс загрязнения снега SCI (Negi et al., 2009).

При определении значений снеговых индексов использовалась программная оболочка QGIS с применением расширения "калькулятор растров". С его помощью значения соответствующих спектральных каналов вводились в формулу. Соответствующие значения индексов получены для каждого пикселя, совпадающего на космическом снимке с точкой измерения (с известными координатами).

### Результаты и обсуждение

На схемах распределения концентрации взвешенных частиц в приземных слоях атмосферы визуально отображен характер загрязнения. Диапазоны варьирования небольшие, среднее значение для  $PM_{2,5}$  составляет  $10,7 \text{ мкг/м}^3$  (разброс значений –  $5,3\text{--}16,7 \text{ мкг/м}^3$ ); для  $PM_{10}$  –  $15,3 \text{ мкг/м}^3$  ( $8,3\text{--}23,3 \text{ мкг/м}^3$ ) (рис. 2), что невелико в сравнении с максимальными разовыми предельно допустимыми концентрациями, которые составляют  $300 \text{ мкг/м}^3$  для  $PM_{10}$  и  $160 \text{ мкг/м}^3$  для  $PM_{2,5}$  (РД 52.04.830-2015, 2015<sup>2</sup>). Это позволяет сделать вывод об отсутствии интенсивной техногенной нагрузки с точки зрения концентрации мелкодисперсных взвешенных частиц. Необходимо уточнить, что проведенные измерения – разовые, а обнаружение участков с высокими концентрациями минеральных пылевых частиц может послужить в качестве рекомендаций для их многолетнего мониторинга.

<sup>2</sup> РД 52.04.830-2015. Массовая концентрация взвешенных частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  в атмосферном воздухе. Методика измерений гравиметрическим методом. СПб. ГГО им. А. И. Воейкова, 2015. 41 с.

Для взвешенных частиц разного диаметра пиковые значения определены в точках опробования № 3 и № 5 в промышленной зоне г. Сургут недалеко от транспортных развязок с высокой интенсивностью движения. Согласно проведенным исследованиям для этих же точек отмечена максимальная концентрация нерастворимых частиц и минерализация снеготалых вод. В этих точках проводился снегоотбор (Тигеев и др., 2022). Весь промышленный район окружен сетью нешироких дорог с малой пропускной способностью. Здесь сконцентрированы узкие улицы с большой транспортной нагрузкой и невысокой пропускной способностью. Для этого участка характерны ежедневные заторы и пробки в часы пик, поэтому экологическая нагрузка от автотранспорта ощущается наиболее остро.

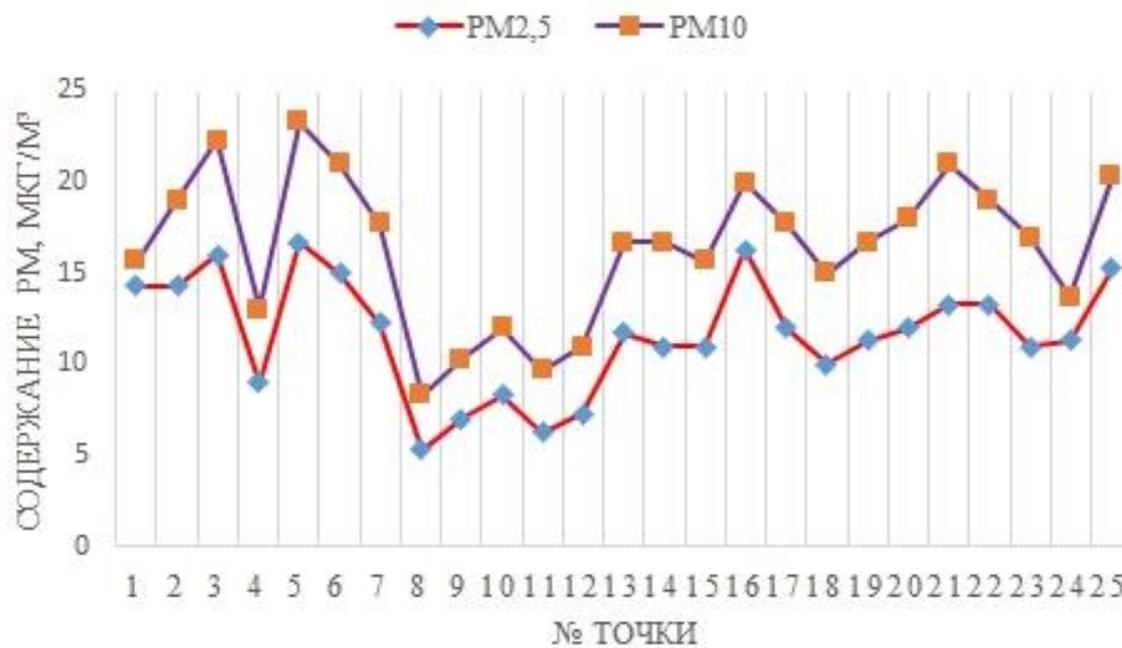


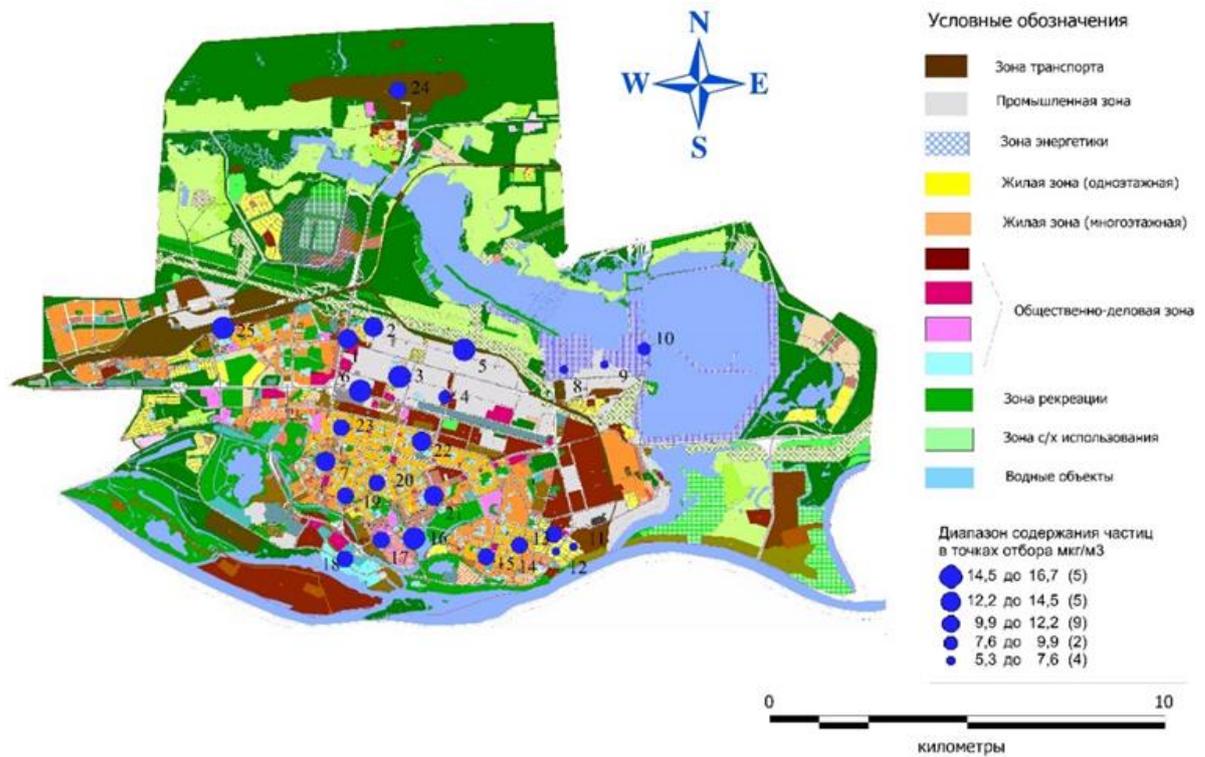
Рис. 2. Концентрация частиц  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  в приземном слое атмосферы г. Сургут

Fig. 2. Concentration of  $PM_{2,5}$  and  $PM_{10}$  particle content in the lower layers of the atmosphere of the Surgut town

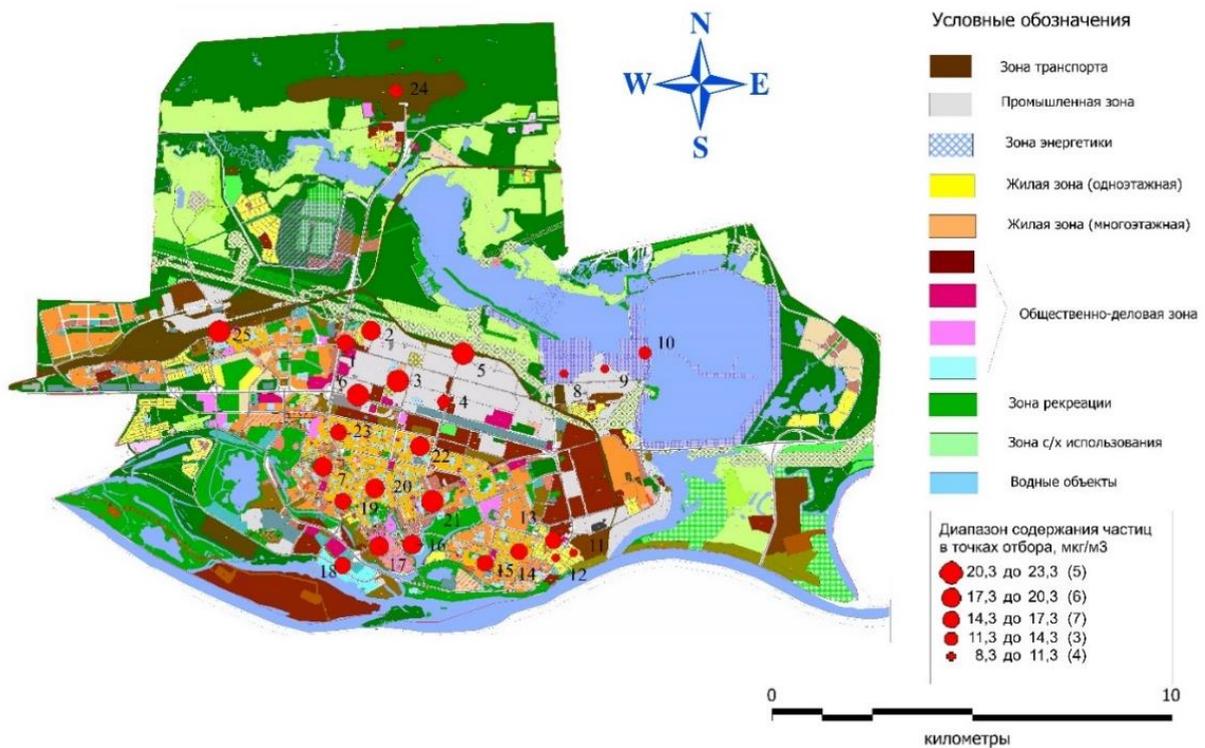
Наличие промышленных предприятий, наряду с автотранспортом, делает промышленную функциональную зону г. Сургута наиболее загрязненной  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  (рис. 3). Именно техногенное давление определяет высокие средние значения пылевых частиц. Немногим уступают по данному показателю жилая многоэтажная и деловая зоны, для которых также существует проблема интенсивного дорожного движения. Сравнительно небольшие средние значения (зона энергетики, точки 8, 9, 10) в районе ГРЭС-2 (6,8 и 10,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  для  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  соответственно) обеспечиваются высотой труб (273 м), позволяющей избежать высокой степени загрязнения приземного слоя атмосферы близ источника выбросов. Невысокая концентрация  $PM$  для участка возле аэропорта г. Сургут и в жилой одноэтажной зоне объясняется невысокой интенсивностью движения автомобильного транспорта (табл. 2). Концентрация взвешенных частиц в городе превалирует над значениями концентрации на условно-фоновой территории ( $PM_{2,5} = 5,2$ ;  $PM_{10} = 7,9$ ).

Таблица 2. Средняя концентрация  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  по зонам с разными режимами использования,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
Table 2. Average concentration of  $PM_{2,5}$  and  $PM_{10}$  in zones with different usage patterns,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Зоны отбора проб	$PM_{2,5}$	$PM_{10}$
Энергетическая	6,8	10,2
Промышленная	14,2	19,1
Общественно-деловая	13,7	17,9
Транспорта (аэропорт)	10,0	15,0
Жилая одноэтажная	8,4	12,5
Жилая многоэтажная	11,9	17,7
Условно-фоновая	5,2	7,9



*a*



*b*

Рис. 3. Схема распределения концентрации мелкодисперсных пылевых частиц в приземных слоях атмосферы г. Сургут: *a* –  $PM_{2,5}$ ; *b* –  $PM_{10}$

Fig. 3. Distribution of particulate matter in the lower layers of the atmosphere of the Surgut town: *a* –  $PM_{2,5}$ ; *b* –  $PM_{10}$

Взвешенные твердые частицы различного происхождения с известной скоростью осаждаются на поверхности. Это позволило предположить связь спектральных данных снега для разных функциональных городских зон г. Сургут и условно-фоновой территории с концентрацией пылевых частиц в приземном слое атмосферы. Максимальный показатель снегового индекса NDSI характерен для наиболее чистого снега с минимальным количеством элементов, искажающих спектральные характеристики на снимке. Для фоновой территории все значения NDSI в точках отбора проб превышают показатель 0,40, определяющий снеговой покров. Среднее значения для условного фона – 0,55, для урбанизированной территории – 0,32. Это указывает на сравнительно небольшую дифференциацию данного параметра. Однако по данным (Сухинин и др., 2011), снег со значением NDSI, не превышающим 0,53, определяется как "грязный". Исходя из этого, снег в городе по показателю нормированного индекса можно отнести к загрязненному. Фоновый участок почти соответствует данному термину, а в некоторых точках и практически совпадает с городскими значениями (табл. 3). Невысокий снеговой индекс некоторых фоновых точек обусловлен влиянием растительного покрова.

Таблица 3. Значения снеговых индексов на территории г. Сургут  
Table 3. Values of snow indices in the territory of the Surgut town

Показатель	Фоновая территория	Город
NDSI	$\frac{0,46-0,59}{0,55}$	$\frac{-0,21-0,50}{0,32}$
SCI	$\frac{0,04-0,08}{0,05}$	$\frac{-0,06-0,25}{0,03}$
S3	$\frac{0,20-0,30}{0,28}$	$\frac{-0,31-0,26}{0,14}$

Примечание. В числителе минимальные и максимальные значения снеговых индексов, в знаменателе – средние.

Нивелирующее влияние растительного покрова индекс S3 показал наиболее значительные различия между условно-фоновой и городской территориями. На условно-фоновом участке значения индекса S3 в два раза превышают городские. Такую же разницу показал индекс SCI. Для города, согласно U-критерию Манна – Уитни, значения S3 и SCI статистически значимо отличаются от фоновых ( $p < 0,05$ ). Это может говорить о важной роли индекса загрязнения в оценке чистоты снежного покрова. Этого нельзя сказать о NDSI, у которого таких различий не наблюдается.

Была выявлена достоверная умеренная связь разовых концентраций PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> с индексом S3 (табл. 4). При исследованиях концентрации взвешенных частиц в г. Нижневартовске (Ханты-Мансийский автономный округ) также было отмечено, что лучше всего индицирует пылевую нагрузку нормированный индекс снега S3 (Тигеев и др., 2022). Это происходит благодаря его свойству уменьшать ошибки, связанные с наличием растительного покрова. Снеговой индекс SCI имеет знак "минус" при загрязненном снежном покрове, знак "плюс" наблюдается у условно чистого снега. В результате исследования установлено, что снежный покров урбанизированной территории имеет заметные различия от фона: 0,03 и 0,05 соответственно.

Таблица 4. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между снеговыми индексами и концентрацией взвешенных частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>  
Table 4. Spermene grade correlation coefficients between snow indices and PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>10</sub> suspended particulate matter

Показатель	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>	NDSI	SCI	S3
PM <sub>2,5</sub>	1				
PM <sub>10</sub>	0,96	1			
NDSI	<b>-0,45</b>	<b>-0,44</b>	1		
SCI	-0,25	-0,20	0,15	1	
S3	<b>-0,38</b>	<b>-0,38</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	1

Примечание. Выделены значения с достоверной связью  $p < 0,05$ .

Была отмечена разница значений снеговых индексов по функциональным зонам города (рис. 4).

Величина индекса S3 уменьшается в ряду: фоновые участки – пригород с малоэтажной коттеджной застройкой, зона одноэтажной застройки – зона воздушного транспорта – общественно-деловая – зона энергетики – промышленная зона – зона многоэтажной застройки.

Сравнивая значения стандартизированного индекса различий снежного покрова наибольшие значения можно отметить для жилой одноэтажной застройки и района аэропорта. Минимум отмечается в общественно-деловой зоне. Индекс SCI (самый загрязненный снежный покров) характерен для общественно-деловой (–0,01) и промышленной зон (0,02). Именно там была выявлена максимальная концентрация  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ . S3 уменьшается по функциональным зонам следующим образом: фоновые участки – пригород с малоэтажной застройкой, зона одноэтажной застройки – зона воздушного транспорта – общественно-деловая – зона энергетики – промышленная зона – зона многоэтажной застройки.

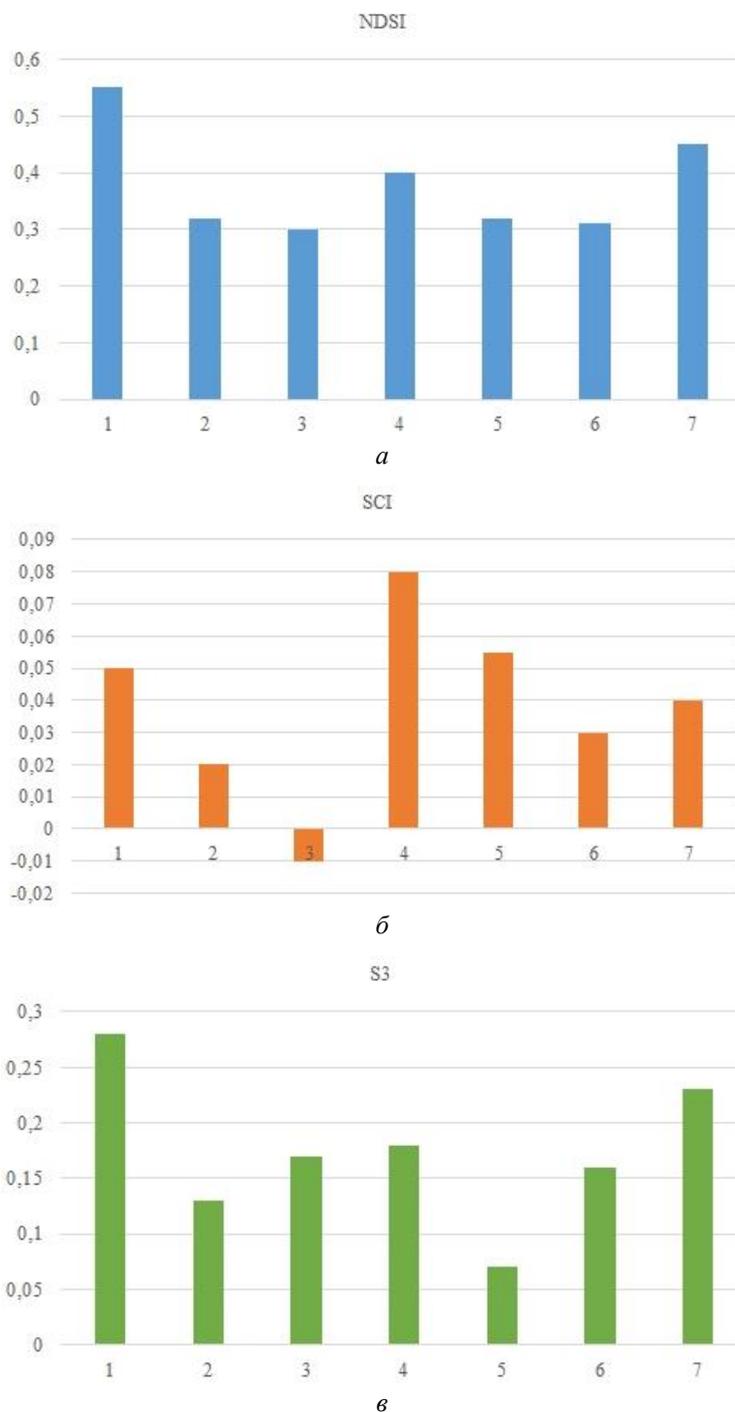


Рис. 4. Значения снеговых индексов (NDSI, S3, SCI) по различным функциональным зонам города и фоновой территории: 1 – фоновый участок; 2 – промышленная; 3 – общественно-деловая; 4 – транспорта; 5 – жилая многоэтажная; 6 – энергетики; 7 – жилая одноэтажная  
Fig. 4. Values of snow indices (NDSI, S3, SCI) for various functional zones of the town and the background territory: 1 – background area; 2 – industrial; 3 – public and business; 4 – transport; 5 – residential multi-storey; 6 – energy; 7 – residential single-storey

## Заключение

Полученные в процессе исследований данные о концентрации  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  позволяют сделать вывод о невысоком техногенном загрязнении приземных слоев атмосферы г. Сургут, не превышающем ПДКм.р. Выявлены две точки (точки 3 и 5, рис. 2) повышенного уровня мелкодисперсных взвешенных частиц для ведения последующего длительного наблюдения, определены факторы, влияющие на повышенные концентрации пылевых частиц в этих точках. Максимальные средние значения  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  отмечаются в промышленной зоне, что определяется высоким техногенным давлением. Также высока концентрация взвешенных частиц в общественно-деловой и жилой многоэтажных зонах, где велика транспортная нагрузка.

Все снеговые индексы показали значительные различия между фоновыми участками и городской территорией. Стандартизованный индекс различий снежного покрова можно определить как "загрязненный".

В районе г. Сургут снежный покров территорий условного фона по значению NDSI близок к определению "загрязненный", что связано с влиянием многочисленных объектов нефтедобычи. При этом и по концентрации пылевых частиц, и по значению NDSI урбанизированная территория отличается от фоновой. Учитывающий влияние растительности индекс S3 продемонстрировал наибольшие различия между условно-фоновыми и городскими участками. На условно-фоновой территории данный индекс в два раза превышает урбанизированные. Такую же разницу показал SCI. Наибольшие показатели корреляционной связи содержания взвешенных частиц со спектральными характеристиками снега показал индекс NDSI. Также достоверная умеренная связь индекса отмечена и для индекса S3. Наименее содержательным для данного исследования оказался SCI. Этот индекс не показал достоверной корреляции с рассмотренными параметрами. Дифференциация по функциональным зонам г. Сургут показала, что наиболее загрязненный снег наблюдается в общественно-деловой и промышленной зонах, что объясняется высокой интенсивностью автотранспорта и влиянием промышленных предприятий. Именно в этих зонах также определена наибольшая концентрация взвешенных частиц, что указывает на связь этих показателей.

## Благодарности

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства науки и высшего образования РФ (№ FWRZ-2026-0022).

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Библиографический список

- Алексеев В. Р. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения земель // Лед и снег. 2013. Т. 53, № 1. С. 127–140. EDN: QBXFJP.
- Боровлев А. Э. Исследования содержания мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе жилой зоны Белгорода // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44, № 1. С. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-1-97-103>. EDN: KDKELV.
- Касимов Н. С., Кошелева Н. Е., Власов Д. В., Терская Е. В. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2012. № 4. С. 14–24. EDN: PJQDER.
- Май И. В., Загороднов С. Ю. Мелкодисперсные пыли в атмосферном воздухе городов федерального проекта "Чистый воздух" как фактор риска здоровью и объект управления // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. 2024. Т. 32, № 12. С. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-12-39-47>. EDN: MJLUEW.
- Сухинин А. И., Воробьева М. В., Охоткина Е. А. Космический мониторинг снегового покрова Сибири по данным радиометра MODIS // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2011. № 4(37). С. 90–96. EDN: OXPSQN.
- Тигеев А. А., Фахретдинов А. В., Пожитков Р. Ю. Пылевая нагрузка и спектральные характеристики снежного покрова в нефтегазодобывающих регионах (на примере г. Сургута) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2022. № 6(309). С. 45–51. DOI: [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2022-6\(309\)-45-51](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2022-6(309)-45-51). EDN: VCMPPM.
- Титкова Т. Б., Китаев Л. М., Виноградова В. В. Короткопериодная изменчивость сроков залегания снежного покрова по данным MODIS на севере Евразии в условиях современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 223–238. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-223-238>. EDN: ZTMXPZ.
- Тунакова Ю. А., Новикова С. В., Шагидуллин А. Р., Шагидуллин Р. Р. Искусственные нейронные сети для расчета концентраций микрочастиц ( $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ ) в атмосферном воздухе на основе результатов измерения суммарного количества взвешенных частиц (на примере г. Казани) // Российский журнал прикладной экологии. 2018. № 1(13). С. 32–37. EDN: OUKSUR.
- Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н. С. Касимова. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1995. 327 с.

- 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 of Environment*. 1995. Vol. 54, Iss. 2. P. 127–140. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P).
- Janssen N. A. H., Fischer P., Marra M., Ameling C. [et al.]. Short-term effects of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> on daily mortality in the Netherlands // *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 463–464. P. 20–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.062>.
- Karimian H., Li Q., Li C., Jin L. [et al.]. An improved method for monitoring fine particulate matter mass concentrations via satellite remote sensing // *Aerosol and Air Quality Research*. 2016. Vol. 16. P. 1081–1092. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.06.0424>.
- Kour R., Patel N., Krishna A. P. Development of a new thermal snow index and its relationship with snow cover indices and snow cover characteristic indices // *Arabian Journal of Geosciences*. 2016. Vol. 9. Article number: 71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2143-6>.
- Maji K. J., Dikshit A. K., Deshpande A. Disability-adjusted life years and economic cost assessment of the health effects related to PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> pollution in Mumbai and Delhi, in India from 1991 to 2015 // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24. P. 4709–4730. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8164-1>.
- Negi H. S., Kulkarni A. V., Semwal B. S. Study of contaminated and mixed objects snow reflectance in Indian Himalaya using spectroradiometer // *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30, Iss. 2. P. 315–325. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802261197>.
- Pozhitkov R. Y., Tigeev A. A., Moskovchenko D. V. Estimation of dust depositions in snow cover using Earth's remote sensing data: Example of Nizhnevartovsk // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2021. Vol. 34. P. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856021010103>.
- Reche C., Moreno T., Amato F., Viana M. [et al.]. A multidisciplinary approach to characterise exposure risk and toxicological effects of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> samples in urban environments // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012. Vol. 78. P. 327–335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.043>.
- Shimamura Y., Izumi T., Matsuyama H. Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation – comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, Iss. 21. P. 4867–4884. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160600639693>.
- Sicard P., Khaniabadi Y. O., Perez S., Gualtieri M. [et al.]. Effect of O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> on cardiovascular and respiratory diseases in cities of France, Iran and Italy // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 32645–32665. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06445-8>.

## References

- Alekseev, V. R. 2013. Snow cover as an indicator of cumulative land pollution. *Ice and Snow*, 53(1), pp. 127–140. EDN: QBXFJP. (In Russ.)
- Borovlev, A. E. 2020. Studies of the content of fine particles in the atmospheric air of the residential area of Belgorod. *Regional Geosystems*, 44(1), pp. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-1-97-103>. EDN: KDKELV. (In Russ.)
- Kasimov, N. S., Kosheleva, N. E., Vlasov, D. V., Terskaya, E. V. 2012. Geochemistry of snow cover in the eastern district of Moscow. *Lomonosov Geography Journal*, 4, pp. 14–24. EDN: PJQDER. (In Russ.)
- May, I. V., Zagorodnov, S. Yu. 2024. Fine particles in ambient air of the cities included in the clean air federal project as health risk factors and control objects. *Public Health and Life Environment – PH&LE*, 32(12), pp. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-12-39-47>. EDN: MJLUEW. (In Russ.)
- Sukhinin, A. I., Vorob'eva, M., Okhotkina, E. A. 2011. Space monitoring of the Siberian snow cover according to the MODIS radiometer. *Vestnik SIBSAU. Aerospace Technologies and Control Systems*, 4(37), pp. 90–96. EDN: OXPSQN. (In Russ.)
- Tigeev, A. A., Fakhretdinov, A. V., Pozhitkov, R. Yu. 2022. Dust load and spectral characteristics of snow cover in oil and gas producing regions (on the example of Surgut). *Environmental Protection in Oil and Gas Complex*, 6(309), pp. 45–51. DOI: [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2022-6\(309\)-45-51](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2022-6(309)-45-51). EDN: VCMPPM. (In Russ.)
- Titkova, T. B., Kitaev, L. M., Vinogradova, V. V. 2017. Short-period variability of snow cover periods according to MODIS data in northern Eurasia under modern climate conditions. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 14(5), pp. 223–238. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-223-238>. EDN: ZTMXPZ. (In Russ.)
- Tunakova, Yu. A., Novikova, S. V., Shagidullin, A. R., Shagidullin, R. R. 2018. Artificial neural networks for calculation of microparticle concentrations (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) in atmospheric air based on the results of measurement of the total amount of suspended particles (on the example of Kazan). *Russian Journal of Applied Ecology*, 1(13), pp. 32–37. EDN: OUKSUR. (In Russ.)
- Ecogeochemistry of urban landscapes. 1995. Ed. N. S. Kasimov. Moscow. (In Russ.)

- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V. 1995. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), pp. 127–140. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P).
- Janssen, N. A. H., Fischer, P., Marra, M., Ameling, C. et al. 2013. Short-term effects of  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5-10}$  on daily mortality in the Netherlands. *Science of the Total Environment*, 463–464, pp. 20–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.062>.
- Karimian, H., Li, Q., Li, C., Jin, L. et al. 2016. An improved method for monitoring fine particulate matter mass concentrations via satellite remote sensing. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, pp. 1081–1092. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.06.0424>.
- Kour, R., Patel, N., Krishna, A. P. 2016. Development of a new thermal snow index and its relationship with snow cover indices and snow cover characteristic indices. *Arabian Journal of Geosciences*, 9. Article number: 71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2143-6>.
- Maji, K. J., Dikshit, A. K., Deshpande, A. 2017. Disability-adjusted life years and economic cost assessment of the health effects related to  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  pollution in Mumbai and Delhi, in India from 1991 to 2015. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp. 4709–4730. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8164-1>.
- Negi, H. S., Kulkarni, A. V., Semwal, B. S. 2009. Study of contaminated and mixed objects snow reflectance in Indian Himalaya using spectroradiometer. *International Journal of Remote Sensing*, 30(2), pp. 315–325. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802261197>.
- Pozhitkov, R. Y., Tigeev, A. A., Moskovchenko, D. V. 2021. Estimation of dust depositions in snow cover using Earth's remote sensing data: Example of Nizhnevartovsk. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 34, pp. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856021010103>.
- Reche, C., Moreno, T., Amato, F., Viana, M. et al. 2012. A multidisciplinary approach to characterise exposure risk and toxicological effects of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  samples in urban environments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 78, pp. 327–335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.043>.
- Shimamura, Y., Izumi, T., Matsuyama, H. 2006. Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation – comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 27(21), pp. 4867–4884. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160600639693>.
- Sicard, P., Khaniabadi, Y. O., Perez, S., Gualtieri, M. et al. 2019. Effect of  $O_3$ ,  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  on cardiovascular and respiratory diseases in cities of France, Iran and Italy. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, pp. 32645–32665. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06445-8>.

#### Сведения об авторе

**Тигеев Александр Анатольевич** – ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, Россия, 625026;  
Институт проблем освоения Севера Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН,  
канд. геогр. наук, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: fic@tmnsc.ru, ttrruubbaa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>

**Alexander A. Tigeev** – 86 Malygina Str., Tyumen, Russia, 625026;  
Institute of the Problems of Northern Development, Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of RAS,  
Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher;  
e-mail: fic@tmnsc.ru, ttrruubbaa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>