

Ю

УДК 551.321.7:004.932

Оценка пылевых выпадений в снежном покрове с использованием данных дистанционного зондирования Земли (на примере г. Нижневартовска)

Р.Ю. Пожитков¹, А.А. Тигеев¹, Д.В. Московченко^{1, 2*}

¹ Тюменский научный центр СО РАН, Институт проблем освоения Севера
625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86

² Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6

Поступила в редакцию 14.05.2020 г.

Оценивается приток пылевого аэрозоля на снежный покров в районе Нижневартовска. Среднее содержание твердых нерастворимых частиц в снеготалых водах условно-фоновой участка составляет 12,0 мг/л, что в 4 раза выше значений для эталонных незагрязненных территорий. Повышенный местный «фон» типичен для Среднего Приобья и связан с влиянием удаленных объектов нефтедобычи. В условиях города приток пылевого аэрозоля увеличивается в 7,5 раз относительно условно-фоновой участка. Поступление пылевых частиц вызывает интенсивное подщелачивание снежного покрова. Результаты, полученные в ходе полевого опробования, сопоставлены со спектральными свойствами снега. По данным Landsat-8 (сенсор OLI) вычислены снеговые индексы (нормализованный разностный индекс, нормированный индекс, индекс загрязнения), которые согласуются с результатами наземных исследований и могут быть использованы для оценки уровня техногенного загрязнения. Для оценки количества пылевых выпадений оптимально использование нормированного индекса снега, для оценки кислотно-щелочных условий (рН) – индекса загрязнения снега.

Ключевые слова: твердый осадок снега, пылевая нагрузка, снеговые индексы, Западная Сибирь, нефтедобыча, урбанизированные территории; snow solid phase, dust load, snow indices, Western Siberia, oil production, urbanized territories.

Введение

Одним из наиболее информативных показателей экологического состояния урбанизированных территорий является химический состав поступающих атмосферных осадков. В северных районах Западной Сибири, где период с отрицательными температурами воздуха длится 6–8 мес., в качестве объекта изучения атмосферных выпадений наиболее часто используется снежный покров. Снег обладает особыми сорбционными свойствами, благодаря которым он аккумулирует значительную часть загрязняющих веществ. Кристаллы снега загрязняются уже в процессе своего образования за счет поглощения мелких частиц (ядер кристаллизации), взвешенных в атмосфере; при выпадении снега также происходит захват и осаждение аэрозольных элементов [1]. Поэтому в снеготалых водах содержание растворенных и взвешенных веществ выше, чем в дождевых осадках.

По показателям загрязнения снежного покрова можно определить количество веществ, поступающих в почвы и поверхностные воды во время снеготая-

ния [2]. Известно, что основная масса загрязнителей из атмосферы содержится в пылевых выпадениях: до 90% и больше концентрируется в твердой фазе, а на жидкую приходится не более 10% [3]. Однако отбор проб снега, их таяние, фильтрация и последующая обработка занимают длительное время. Поэтому на практике для оценки интенсивности поступления загрязнителей исследователи ограничиваются относительно небольшим количеством проб. При изучении загрязнения больших территорий подобный метод предполагает интерполяцию и экстраполяцию полученных результатов, что снижает точность оценок.

Альтернативный вариант предполагает использование данных дистанционного зондирования (ДДЗ), обладающих такими преимуществами, как охват больших территорий, включая труднодоступные районы, высокая оперативность, возможность многократно наблюдать исследуемые участки, достоверность и простота получения данных, а также их относительно низкая стоимость по сравнению с наземными исследованиями [4]. Использовать отражательную способность снежного покрова для оценки его распространения и свойств начали в 80-х гг. XX в. в Советском Союзе [5, 6] и в США [7, 8]. Поступление пыли существенно изменяет оптические свойства снежного покрова, в частности снижает

* Роман Юрьевич Пожитков (pozhitkov-roma@yandex.ru); Александр Анатольевич Тигеев (ttrruubbaa@mail.ru); Дмитрий Валерьевич Московченко (moskovchenko@hotmail.ru).

его альbedo [9, 10]. По аналогии с вегетационным индексом NDVI для картирования снежного покрова было предложено использовать нормализованный разностный индекс снега NDSI, основанный на различной отражательной способности снега в видимой и инфракрасной частях спектра [11].

В настоящее время в России спектральные характеристики снежного покрова часто используются для анализа экологической ситуации. Методом прямого дешифрирования ДДЗ оценена площадь загрязнения земель в различных федеральных округах России, в том числе Уральском, к которому относится Нижневартовск [12]. С использованием данных MODIS и наземных наблюдений изучено загрязнение снежного покрова юга Западной Сибири, позволившее оценить экологическую ситуацию в Новосибирске, Томске, Кемерове, Барнауле, Искитиме [13–16]. Был разработан метод выделения зон аэротехногенного загрязнения вокруг промышленных объектов в тундровой зоне европейской территории страны, основанный на сопоставлении результатов химического анализа образцов снежного покрова и яркостных характеристик поверхности [17].

В северных районах Западной Сибири подобные исследования не проводились, хотя уровень техногенного воздействия на этой территории постоянно растет в связи с развитием добычи углеводородного сырья, транспортной инфраструктуры и увеличением численности населения. Загрязнение атмосферы является одной из основных экологических проблем при добыче нефти и газа. В полярных и бореальных районах неоднократно отмечалось загрязнение снежного покрова на месторождениях углеводородов. В частности, было выявлено загрязнение тяжелыми металлами на месторождениях Аляски [18], Канады [19], в таежной зоне Западной Сибири [20]. Поэтому изучение выпадения пылевых частиц из атмосферы в районах нефтедобычи – важная научная и практическая задача.

Цель настоящей работы – оценка пылевых выпадений, аккумулированных в снежном покрове Нижневартовска, с использованием наземных и дистанционных методов.

Расположенный в Среднем Приобье Нижневартовск является одним из крупнейших центров нефтяной промышленности и занимает одно из первых мест в Ханты-Мансийском автономном округе по количеству выбросов в атмосферу. Основной источник загрязнения в Нижневартовске – автотранспорт, доля которого составляет более 55% [21]. С севера и запада к городу примыкают Самотлорское и Мегионское месторождения, представляющие собой источники атмосферных эмиссий. В результате факельного сжигания попутного нефтяного газа формируются обширные шлейфы аэрозольного загрязнения [22]. Исследования состава воздуха над Нижневартовском показали, что атмосфера города сильно загрязняется выбросами факелов с прилегающих месторождений [23].

В предшествующих исследованиях [21] были определены приоритетные металлы-загрязнители

снежного покрова (Mn, Ni, Fe, Zn), что позволило сделать вывод о преобладании дорожной пыли в составе выпадений. Однако плотность потока загрязнителей не определялась.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: путем наземного опробования оценить интенсивность пылевых выпадений и определить физико-химические показатели снега, подсчитать значения снеговых индексов, оценить возможность количественного определения пылевых выпадений с помощью ДДЗ.

Материалы и методы

В работе применялась общепринятая методика изучения аэрогенных ореолов загрязнения [24, 25]. Пробы снега были отобраны в Нижневартовске и на прилегающей территории в период максимального влагозапаса (25–30 марта 2019 г.): использовался весовой снегомер ВС-43. Схема опробования представлена на рисунке.

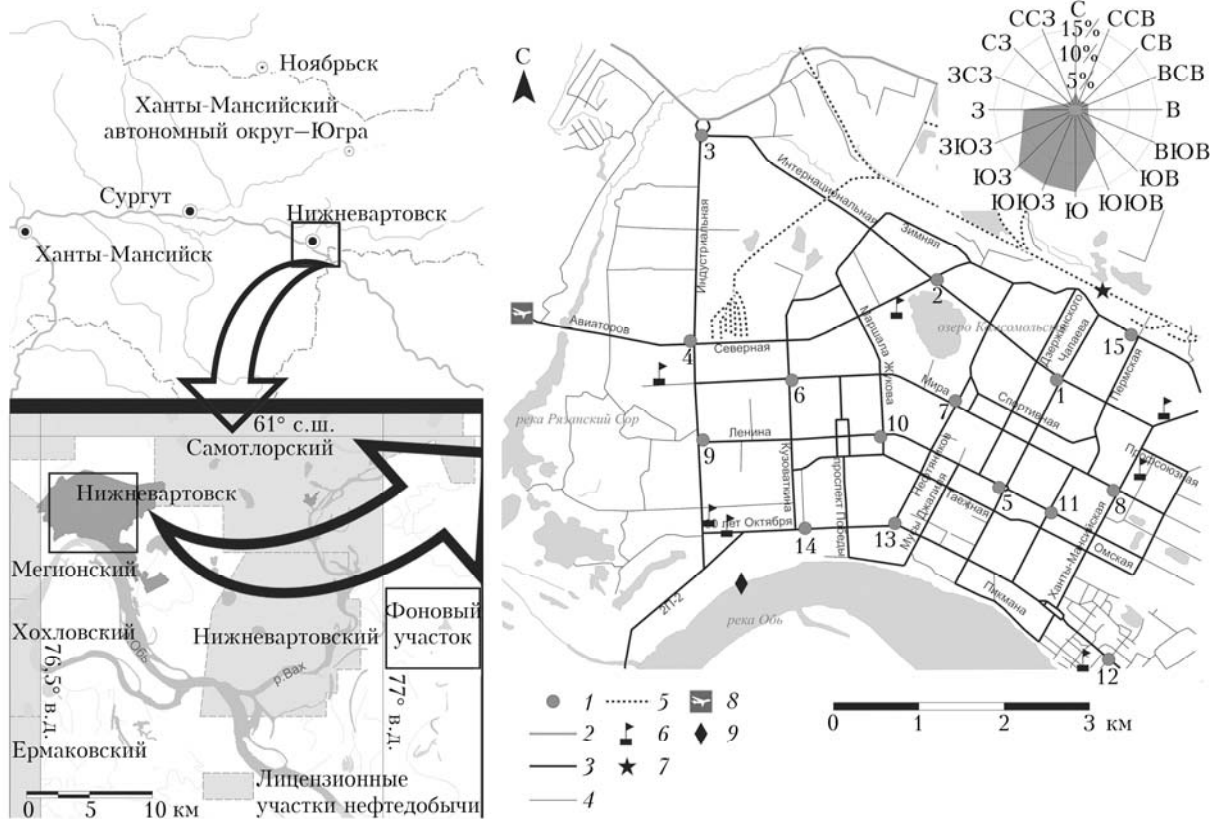
В городе отбор проб был выполнен на приблизительно одинаковом расстоянии от автодорог. На месте пробоотбора была измерена мощность снежного покрова, определены объем снега и его плотность. Всего было 20 проб снега: 15 – на урбанизированной территории с различной степенью антропогенного воздействия, 5 – на условно-фоновом участке, расположенном на расстоянии > 25 км от города в восточно-юго-восточном направлении. Отбор условно-фоновых проб проводился на расстоянии не менее 500 м от автодороги. С начала снегостава до момента опробования (15 октября 2018 г. – 30 марта 2019 г.), согласно [26], преобладали ветра южного и юго-западного направлений (рисунок), северо-западное направление ветра было крайне редким, поэтому перенос загрязнителей от города можно считать преобладающим малым.

После таяния снега при комнатной температуре измерялась величина рН с помощью портативного прибора рН-009(1). Затем пробы были профильтрованы через химически чистый обеззоленный фильтр «Синяя лента». Масса взвеси на фильтре, высушенном при $t = 105^\circ \text{C}$, была определена лабораторными аналитическими весами ВЛТ-1500П. Пылевую нагрузку (P_n – показатель пылевой нагрузки, мг/м² в сутки) вычисляли по формуле

$$P_n = \frac{m}{160S}, \quad (1)$$

где m – масса взвеси на фильтре, мг; 160 – продолжительность залегания снега, дни; S – площадь шурфа, м².

В качестве материала для оценки загрязнения снежного покрова использовался мультиспектральный спутниковый снимок Landsat-8 (сенсор OLI) территории Нижневартовска и окрестностей с пространственным разрешением 30 м, сделанный во время полевого опробования (26 марта 2019 г.). Снимок находится в открытом доступе (landsatlook.usgs.gov). Геометрическая и атмосферная коррекция снимка выполнены в программном комплексе ENVI 5.2.



Карта-схема района работ: 1 – точки опробования снежного покрова; 2 – дороги регионального значения; 3 – дороги городского значения; 4 – дороги местного значения; 5 – железная дорога; 6 – муниципальные котельные; 7 – железнодорожная станция; 8 – аэропорт; 9 – речной порт

Для определения взаимосвязи интенсивности осадения 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 (S3) и индекс загрязнения (CI). Подсчеты проводились для пикселей, на которые попадали точки отбора проб.

NDSI, разработанный для оценки распространения снежного покрова, основан на различной отражательной способности снега в видимой и инфракрасной частях спектра [11]. Для снимков Landsat формула расчета NDSI имеет вид

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}, \quad (2)$$

где Green и SWIR – коэффициент отражения в зеленом (0,53–0,6 мкм) и инфракрасном диапазонах (1,56–1,66 мкм).

В том случае, когда снег частично закрыт растительностью, используют нормированный индекс снега [27]:

$$S3 = \frac{NIR(Red - SWIR)}{(NIR + Red)(NIR + SWIR)}, \quad (3)$$

где NIR, Red – коэффициенты отражения в ближнем инфракрасном (0,85–0,89 мкм), видимом красном (0,63–0,68 мкм) диапазонах.

Эффект загрязнения снега атмосферными аэрозолями или углеродной сажей максимален в видимой области и уменьшается с увеличением длины волны. В диапазоне спектра более 1,3 мкм влияние загрязнения незначительно [28, 29]. Исходя из этого, был предложен индекс загрязнения снега SCI [30]:

$$SCI = \frac{Blue - Green}{Blue + Green}, \quad (4)$$

где Blue – коэффициент отражения в синем диапазоне (0,450–0,515 мкм).

Статистическая обработка данных была выполнена с помощью пакетов Microsoft Office Excel и Statistica 6.0. Были подсчитаны средние значения определенных параметров для условно-фонового и урбанизированной территорий. Достоверность различий между фоновыми и урбанизированными участками определяли путем вычисления критерия Манна–Уитни. Для оценки зависимости спектральных характеристик снежного покрова от величины пылевой нагрузки, pH и плотности снега был проведен корреляционный анализ. Поскольку распределение значений пылевой нагрузки и pH в выборке, охватывающей фоновые и урбанизированные участки,

не соответствовало нормальному закону, были подсчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена.

Результаты и обсуждение

В пределах городской застройки мощность снежного покрова изменялась от 28 до 59 см и в среднем составила 43 см (табл. 1).

Таблица 1

Физические характеристики снежного покрова и показатели пылевых выпадений

Параметр	Город	Условно-фоновая территория
Мощность покрова, см	<u>32–59</u> 43	<u>40–63</u> 53
Плотность снега, г/см ³	<u>0,14–0,31</u> 0,23	<u>0,21–0,26</u> 0,23
pH	<u>6,9–8,1</u> 7,4	<u>4,3–4,9</u> 4,6
Содержание нерастворимых частиц, мг/л	<u>27,8–284,0</u> 108,3	<u>5,3–17,6</u> 12,0
Пылевая нагрузка, мг/м ² в сутки	<u>17,1–235,8</u> 66,8	<u>4,6–13,8</u> 8,9

Примечание. Числитель – пределы варьирования, знаменатель – среднее значение.

На условно-фоновой территории высота снежного покрова была больше, чем в городских условиях, – 40–63 см, в среднем 53 см. Плотность снега в фоновых условиях варьируется в узких пределах, от 0,21 до 0,26 г/см³. В городе плотность снега изменяется значительно, от 0,14 до 0,31 г/см, что говорит о большой изменчивости микроклиматических условий, определяющих режим снеготаяния. Важный индикатор интенсивности пылевой нагрузки – величина pH. Многочисленные исследования свидетельствуют о подщелачивании снеготалых вод на урбанизированных территориях, одной из главных причин которого является оседание карбонатной строительной пыли [31] либо силикатных частиц [32]. Подщелачивание снеготалых вод в Нижневартовске с ростом значений pH на 1,3–2,4 ед. было отмечено в более ранних исследованиях [21].

Проведенные исследования показали, что на условно-фоновом участке воды имеют кислую реакцию, значения pH изменяются в диапазоне 4,3–4,9. В городе реакция меняется от нейтральной до слабощелочной (pH = 6,9–8,1). Критерий Манна–Уитни показал достоверность различий между городскими и условно-фоновыми участками по величине pH ($\alpha = 0,01$). Подщелачивание снега относительно фонового участка в среднем составило 2,8, что является весьма большим значением. Так, в Восточном административном округе Москвы разница между фоновыми участками и урбанизированной территорией составила 0,4 [3]. Рост значений pH говорит о высокой пылевой нагрузке.

Определение количества твердых нерастворимых частиц путем фильтрации снеготалых вод подтверждает возрастание запыленности атмосферы в городских условиях. Содержание твердофазных выпадений в снежном покрове условно-фоновых участков в среднем составляет 12,0 мг/л, что в 9 раз меньше, чем на урбанизированной территории (табл. 1).

В [33] было отмечено, что в снеге удаленных районов Арктики фоновое содержание нерастворимых частиц находится в пределах 0,2–3 мг/л. Если принять за нормативную величину фонового содержания пыли 3 мг/л, в снеге условно-фоновых участков в районе Нижневартовска содержание пылевых частиц в среднем в 4 раза больше, чем на эталонных территориях (удаленные участки Арктики). Выявленное превышение, вероятно, связано с влиянием местных источников загрязнения атмосферы, в том числе объектов нефтедобывающего комплекса. В предшествующих исследованиях показано, что содержание нерастворимых частиц в снеге на территории Среднего Приобья составляет более 10 мг/л, что связано с работой факелов сжигания попутного газа, отопительных систем и транспортной нагрузкой [34].

Средняя величина пылевой нагрузки на условно-фоновом участке (8,9 мг/м² в сутки) незначительно выше полученной на фоновых участках соседней Томской обл. и составляющей, согласно [35], 7 мг/м² в сутки. В более южных, лесостепных и южнотаежных районах Западной Сибири интенсивность выпадения твердых частиц на фоновых участках меньше – порядка 3 мг/м² в сутки [36, 37]. Таким образом, на условно-фоновом участке величина пылевой нагрузки превышает показатели, отмеченные на территориях, не подверженных влиянию локальных источников – объектов нефтедобывающего комплекса.

Пылевая нагрузка на территории города составляет в среднем 66,8 мг/м² в сутки (разброс значений от 17,1 до 235,8). Полученные величины близки к результатам исследования пылевых выпадений в Томске, где их количество меняется от 16 до 303, в среднем 63 мг/м² в сутки [38]. По сравнению с условно-фоновыми участками на территории Нижневартовска пылевая нагрузка возрастает в 7,5 раза. Такой рост, судя по приводимым в литературных источниках результатам, типичен для крупных городов Сибири. Так, в Новосибирске среднее содержание взвешенных веществ в снежном покрове в 6 раз выше фонового уровня, а вблизи автомагистралей – в 50 раз [39]. По данным [40] в промышленной агломерации Томск–Северск в 2006–2013 гг. пылевая нагрузка превышала фоновый уровень в 3,6–5,4 раза. Сравнение с соответствующими данными в районах горнодобывающих производств Сибири показывает, что в Нижневартовске количество твердофазных выпадений умеренное. В районе воздействия предприятий Норильского промышленного района пылевая нагрузка местами превышает 1000 мг/м² в сутки [41]. Среднее значение пылевой нагрузки на участках промышленного воздействия

в Свирске (Иркутская обл.) составляет 281 мг/м² в сутки, что превышает фон в 4 раза [42].

Согласно [3] среднесуточная пылевая нагрузка менее 200 мг/м² считается низкой, уровень загрязнения при этом – неопасным. В Нижневартовске только в одной пробе содержание нерастворимых частиц было выше этого уровня. Таким образом, Нижневартовск характеризуется как город с умеренным потоком атмосферных пылевых выпадений. Максимальные значения рН и пылевая нагрузка (235,8 мг/м² в сутки) были выявлены в точке 6, расположенной в западной части Нижневартовска, на границе общественно-деловой зоны и зоны многоэтажной застройки [43]. Вероятно, главный источник загрязнения – проходящая поблизости стройка торгового центра, следствием которой является интенсивное выпадение карбонатной строительной пыли. Повышенная пылевая нагрузка (116,4 мг/м²) была отмечена в непосредственной близости от городской котельной.

В предшествующих исследованиях были установлены зависимости между спектральной отражательной способностью снега и количеством твердых примесей в нем. Наиболее часто при этом использовался индекс NDSI. Известно, что снежный покров имеет значения NDSI > 0,4 [11]. Согласно данным [44] для чистого свежеснеженного снега NDSI ≈ 0,9, при поступлении пыли он снижается. Полевой эксперимент с внесением золы показал, что величина NDSI изменяется от 0,83 в незагрязненном снеге до 0,37 при максимальной степени загрязнения [29]. Результаты подсчетов снеговых индексов на территории Нижневартовска представлены в табл. 2. По критерию Манна–Уитни на территории города значения всех снеговых индексов отличаются от значений на условно-фоновом участке с высокой степенью достоверности ($p < 0,01$), что подтверждает их индикаторную роль для оценки уровня загрязнения снега.

Таблица 2

Значения снеговых индексов на территории Нижневартовска 26 марта 2019 г.

Индекс	Условно-фоновая территория	Городская застройка
NDSI	<u>0,46–0,56</u> 0,50	<u>0,41–0,46</u> 0,43
S3	<u>0,69–1,21</u> 0,94	<u>0,18–0,71</u> 0,44
SCI	<u>0,054–0,089</u> 0,065	<u>0,021–0,044</u> 0,033

Значения NDSI изменялись от 0,41 до 0,46 на условно-фоновом участке и от 0,46 до 0,51 в условиях города. Полученные значения близки к нижней границе, по которой определяют распространение снежного покрова (0,4). Ранее, в ходе мониторинга снежного покрова Сибири с использованием данных радиометра MODIS, снежный покров с NDSI < 0,53 был отнесен к категории «грязного» [14]. Вероятно, полученные нами на фоновой территории низкие значения NDSI, характерные

для загрязненных участков, связаны с наличием лесной растительности. «Нивелирующий» влияние растительного покрова индекс S3 показал значительные различия между городской и условно-фоновой территорией: среднее значение S3 на последней выше в 2,1 раза. Сходным образом значения индекса SCI на фоновых участках выше в 2 раза (табл. 2).

Величина пылевой нагрузки и рН снеготалых вод достоверно коррелируют со снеговыми индексами (табл. 3). Сильная зависимость индекса S3 от пылевой нагрузки ($r = -0,72$) делает его наиболее пригодным для оценки твердых атмосферных выпадений, что обусловлено свойством индекса уменьшать ошибки, связанные с наличием растительного покрова [26]. Величина рН в наибольшей степени зависит от значений SCI ($r = 0,69$). От плотности снега индексы не зависят.

Таблица 3

Коэффициенты ранговой корреляции между плотностью снега (г/см³), рН, величиной пылевой нагрузки (мг/м² в сутки) и снеговыми индексами

Параметр	Плотность снега	рН	Пылевая нагрузка	NDSI	S3	SCI
Плотность снега	1					
рН	-0,18	1				
Пылевая нагрузка	0,09	0,63*	1			
NDSI	-0,14	-0,6*	-0,63*	1		
S3	-0,1	-0,59*	-0,72*	0,82*	1	
SCI	-0,17	-0,69*	-0,5**	0,58*	0,6*	1

* значения с достоверной связью $p < 0,01$; ** $p < 0,05$.

Таким образом, снеговые индексы достаточно точно характеризуют важные для геоэкологической оценки параметры снежного покрова: количество пылевых включений и кислотно-щелочные условия. Наличие достоверных корреляционных связей дает возможность использовать снеговые индексы при оценке интенсивности загрязнения.

Заключение

В районе Нижневартовска, даже вне зон прямого воздействия локальных антропогенных источников, количество пылевых выпадений в 4 раза превышает значения, свойственные эталонным незагрязненным территориям, что связано с влиянием многочисленных объектов нефтедобычи. На территории города пылевая нагрузка возрастает в 7,5 раз по сравнению с условно-фоновыми участками. Одним из следствий этого является значительное подщелачивание снеготалых вод. Рост значений рН относительно фоновых участков в среднем составил 2,8; количество пылевых выпадений в среднем – 66,8 мг/м² в сутки и соответствует показателям, типичным для крупных городов Западной Сибири (Томск, Новосибирск).

Снеговые индексы, основанные на различной отражательной способности чистого и загрязненного

снега в разных диапазонах, характеризуют изменения минерализации снеготалых вод и являются информативными показателями кислотно-щелочных условий и количества пылевых выпадений. Статистическая обработка показала достоверность различий снеговых индексов для урбанизированной территории и условно-фонового участка. Для определения рН лучшие результаты дает индекс загрязнения снега SCI, для оценки количества пыли – нормированный индекс S3. Указанные индексы, полученные путем обработки космоснимков Landsat-8, могут быть использованы для анализа загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных территорий более эффективно, чем широко распространенный индекс NDSI.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-50062\19) и в рамках фундаментальных исследований СО РАН (проект № АААА-А17-117050400146-1).

1. Алексеев В.Р. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения земель // Лед и Снег. 2013. Т. 121, № 1. С. 127–140.
2. Касимов Н.С. Экогеохимия городских ландшафтов. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1995. 336 с.
3. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 4. С. 14–24.
4. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
5. Усачев В.Ф. Временные методические рекомендации по использованию спутниковой информации: Оценка загрязнения снежного покрова вблизи промышленных центров. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 47 с.
6. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 176 с.
7. Dozier J., Schneider S.R., McGinnis Jr.D.F. Effect of grain size and snowpack water equivalence on visible and near-infrared satellite observations of snow // Water Resour. Res. 1981. V. 17. P. 1213–1221.
8. Dozier J. Snow reflectance from Landsat-4 thematic mapper // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1984. N. 3. P. 323–328.
9. Higuchi K., Nagoshi A. Effect of particulate matter in surface snow layers on the albedo of perennial snow patches // IAHS-AISH Publ. 1977. V. 118. P. 95–97.
10. Warren S.G. Impurities in snow: Effects on albedo and snowmelt // Ann. Glaciol. 1984. V. 5. P. 177–179.
11. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data // Remote Sens. Environ. 1995. V. 54. P. 127–140.
12. 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.
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 атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 60–66.
14. Сухинин А.И., Воробьева М.В., Охоткина Е.А. Космический мониторинг снежного покрова Сибири по данным радиометра MODIS // Вестн. Сиб. гос.

- аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2011. Т. 37, № 4. С. 90–96.
15. Раныта В.Ф., Ярославцева Т.В. Оценка длительного загрязнения атмосферного воздуха города по данным наземного и спутникового мониторинга состояния снежного покрова // Докл. XV Всерос. открытой конф. «Совр. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса»: Сб. тез. 2017. С. 109.
16. Раныта 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.
17. 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.
18. Snyder-Conn E., Gabriano J.R., Hoffman G.L., Oelkers A. Soluble trace elements and total mercury in Arctic Alaskan snow // Arctic. 1997. V. 50, N. 3. P. 201–215.
19. Guéguen C., Cussb C.W., Cho S. Snowpack deposition of trace elements in the Athabasca oil sands region, Canada // Chemosphere. 2016. V. 153. P. 447–454.
20. 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.
21. Пожитков Р.Ю., Московченко Д.В., Кудрявцев А.А. Геохимия снежного покрова г. Нижневартовска // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Экология и природопользование. 2018. Т. 4, № 1. С. 6–24.
22. Полищук Ю.М., Токарева О.С. Геоимитационное моделирование зон атмосферного загрязнения в результате сжигания газа на нефтяных месторождениях // Информационные системы и технологии. 2010. Т. 58, № 2. С. 39–46.
23. Антонович В.В., Белан Б.Д., Вавер В.И., Ковалевский В.К., Рассказчикова Т.М., Сибирко А.В., Толмачев Г.Н. Оценка качества воздуха нефтегазодобывающих районов // Исследования эколого-географических проблем природопользования для обеспечения территориальной организации и устойчивости развития нефтегазовых регионов России: Теория, методы и практика. Нижневартовск: НГПИ, ХМРО РАН, ИОА СО РАН, 2000. С. 216–220.
24. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сагет, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. (ред.). М.: Недра, 1990. 335 с.
25. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186 № 2932–83. М.: Госкомгидромет, 1991. 693 с.
26. Архив погоды в Нижневартовске. [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 7.07.2020).
27. Saito A., Yamazaki T. Characteristics of spectral reflectances for vegetation ground surfaces with snow cover: Vegetation indices and snow indices // J. Jap. Soc. Hydrol. Water Resour. 1999. V. 12. P. 28–38.
28. Warren S.G., Wiscombe W.J. A model for the spectral albedo of snow – II: Snow containing atmospheric aerosols // J. Atmos. Sci. 1980. V. 37. P. 2734–2745.
29. 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. V. 30, N 2. P. 315–325.
30. Negi H.S., Singh S.K., Kulkarni A.V., Semwal B.S. Field-based spectral reflectance measurements of seasonal snow cover in the Indian Himalaya // Int. J. Remote Sens. 2010. V. 31, N 9. P. 2393–2417.
31. Касимов Н.С. Регионы и города России: Интегральная оценка экологического состояния. М.: ИП Филимонов М.В., 2014. 560 с.

32. Крутских Н.В., Кравченко И.Ю. Использование космоснимков Landsat для геоэкологического мониторинга урбанизированных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 2. С. 159–168.
33. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р., Горюнова Н.В., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Кривс М., Новигатский А.Н., Соколов В.Т., Филиттов А.С., Хаас Х. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Т. 75, № 1. С. 106–118.
34. Шевченко В.П., Воробьев С.Н., Кирпотин С.Н., Крицков И.В., Манасыпов Р.М., Покровский О.С., Политова Н.В. Исследование нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 499–504.
35. 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 Томс. политехнич. ун-та, 2010. 264 с.
36. Литау В.В., Таловская А.В., Лончакова А.Д., Третьякова М.И., Михайлова К.Ю. Уровень пылевого загрязнения атмосферы г. Омска по данным снегогеохимической съемки // Современные проблемы геохимии: Материалы конф. молодых ученых. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2013. С. 82–84.
37. Ермолов Ю.В., Смоленцев Н.Б. Зимний фоновый сток примесей атмосферы на юго-востоке Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 1. С. 75–81.
38. Таловская А.В. Геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории г. Томска // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 519–524.
39. Сысо А.И., Артамонова В.С., Сидорова М.Ю., Ермолов Ю.В., Черевко В.С. Загрязнение атмосферы, снежного и почвенного покрова г. Новосибирска // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 663–669.
40. Таловская А.В., Филimonенко Е.А., Язиков Е.Г. Динамика элементного состава снежного покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 491–495.
41. Онучин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Третьилова О.В., Данилова И.В. Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21, № 6. С. 1025–1037.
42. Холодова М.С., Пастухов М.В., Полетаева В.И. Особенности минерально-вещественного состава твердофазных выпадений снежного покрова территории г. Свирска // Изв. Сиб. отделения РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 4 (57). С. 109–118.
43. Концепция пространственного развития города Нижневартовска. Схема пространственно-функциональной организации территории [Электронный ресурс]. URL: <https://nizhnevartovsk.itpgrad.ru/spatialdevelopment> (дата обращения: 30.04.2010).
44. Kulkarni A.V., Srinivasulu J., Manjul S.S. Field based spectral reflectance studies to develop NDSI method for snow cover monitoring // J. Indian. Soc. Remote Sens. 2002. V. 30. P. 73–80.

R.Yu. Pozhitkov, A.A. Tigeev, D.V. Moskovchenko. Assessment of dust fallout in the snow cover using remote sensing data: the case of Nizhnevartovsk.

The dust deposition to the snow cover in the city of Nizhnevartovsk is assessed. It is shown that background concentration of particles in the snow averages 12.0 mg/l, which 4 times exceeds the values of the reference non-polluted territories. This difference may be caused by oil production facilities. The snow in the urban area is highly enriched with dust particles. The deposition fluxes in the city of Nizhnevartovsk is 7.5 times higher than in background sites. It is found that dust deposition causes intense alkalization. The results are compared with the spectral properties of snow. Snow indices (normalized difference index, normalized index, and pollution index) are calculated using Landsat-8 OLI data. Snow indices are consistent with the results of ground-based studies and can be used to assess the level of anthropogenic pollution. It is concluded that the optimal way to estimate the amount of dust deposition is to use the normalized snow index; and to assess alkalization, to use the snow pollution index.