

УДК: 911.9

DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-394-408

П.Г. Михайлюкова<sup>1</sup>, Д.А. Петраков<sup>2</sup>, О.В. Тутубалина<sup>3</sup>, М.В. Зимин<sup>4</sup>, М.А. Викулина<sup>5</sup>

## АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА АРКТИЧЕСКИХ ГОРОДОВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АЛЬБЕДО

### АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты работы, посвященной анализу применимости снимков оптического диапазона Sentinel-2/MSI для решения задач мониторинга загрязненности снежного покрова промышленных арктических городов. Первоначально авторами выполняется оценка точности расчета значений альbedo по космическим снимкам на основе наземных измерений альbedo пиранометром в г. Москва и г. Кировск. Статистический анализ показал высокую взаимосвязь между наземными и спутниковыми измерениями альbedo, что позволяет использовать количественные значения альbedo при пространственно-временном анализе загрязненности снежного покрова. Для трех городов (Мурманск, Воркута, Норильск), различающихся между собой физико-географическими условиями и типом промышленных предприятий, проведен анализ загрязненности снежного покрова за период 2016–2020 гг. Для Мурманска основным загрязнителем является угольная пыль от морского порта, где происходит перевалка угля открытым способом. В начале 2020 г. властями города завершено строительство пылезащитного экрана вокруг терминалов порта для сокращения загрязненности городской среды. Проведенный в работе анализ показал, что установленный экран существенно сократил площадь загрязнения в черте города Мурманск. В работе показано, что для Мурманска, при высоте более 120 м, значения альbedo соответствуют максимальным значениям для выбранной даты, что говорит о том, что угольная пыль распространяется для территорий, расположенных на высотах менее 100 м. Для Воркуты и Норильска многолетней динамики значений альbedo выявить не удалось, а загрязненный снежный покров наблюдается на расстоянии до 10 км от предприятий-загрязнителей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** снежный покров, загрязненность, промышленные города Арктики, альbedo, угольная пыль

---

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: [p.mikhaylyukova@gmail.com](mailto:p.mikhaylyukova@gmail.com)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: [dpetrakov@gmail.com](mailto:dpetrakov@gmail.com)

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: [olgatut@mail.ru](mailto:olgatut@mail.ru)

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: [ziminmv@mail.ru](mailto:ziminmv@mail.ru)

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: [masanna2003@mail.ru](mailto:masanna2003@mail.ru)

**Polina G. Mikhaylyukova<sup>1</sup>, Dmitry A. Petrakov<sup>2</sup>, Olga V. Tutubalina<sup>3</sup>, Mikhail V. Zimin<sup>4</sup>,  
Marina A. Vikulina<sup>5</sup>**

## **ANALYSIS OF SNOW COVER POLLUTION IN ARCTIC CITIES BASED ON SATELLITE ALBEDO MEASUREMENTS**

### **ABSTRACT**

The article presents the results of the work devoted to the analysis of the Sentinel-2/MSI optical images applicability for monitoring the snow cover pollution in industrial Arctic cities. Initially, the authors evaluate the accuracy of calculating the albedo values from satellite images based on the albedo ground-based measurements with a pyranometer in Moscow and Kirovsk. Statistical analysis has shown a high correlation between ground-based and satellite albedo measurements, which makes it possible to use quantitative albedo values in the spatiotemporal analysis of snow cover contamination. For three cities (Murmansk, Vorkuta, Norilsk) that differ in physical and geographical conditions and the type of industrial enterprises, the analysis of snow cover contamination for the period 2016–2020 was carried out. For Murmansk, the main pollutant is coal dust from the seaport, where coal is handled in an open way. In early 2020, the city authorities have completed the construction of a dust screen around the port terminals to reduce urban pollution. The analysis carried out in the work showed that the installed screen significantly reduced the area of pollution in the city of Murmansk. For terrain height more than 120 m, the albedo values correspond to the maximum values for the selected date, which indicates that coal dust spreads for territories located at altitudes of less than 100 m. It was not possible to identify long-term dynamics of albedo values for Vorkuta and Norilsk. Polluted snow cover is observed at a distance of up to 10 km from polluting enterprises.

**KEYWORDS:** snow cover, pollution, industrial cities of the Arctic, albedo, coal dust

---

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia;  
*e-mail:* [p.mikhaylyukova@gmail.com](mailto:p.mikhaylyukova@gmail.com)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia;  
*e-mail:* [dpetrakov@gmail.com](mailto:dpetrakov@gmail.com)

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia;  
*e-mail:* [olgatut@mail.ru](mailto:olgatut@mail.ru)

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia;  
*e-mail:* [ziminmv@mail.ru](mailto:ziminmv@mail.ru)

<sup>5</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia;  
*e-mail:* [masanna2003@mail.ru](mailto:masanna2003@mail.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Снежно-ледовый покров является одним из главных индикаторов климатических изменений, а в заселенных территориях и в районах активного промышленного освоения – показателем уровня загрязнения [Naegeli et al., 2019]. Изменения в свойствах льда и снега, связанные с климатическими и антропогенными факторами, обуславливают изменение их отражательной способности (альbedo) как в пространстве, так и во времени. Привлечение методов дистанционного зондирования позволяет выполнять пространственно-временной анализ изменений значений альbedo в широком спектральном диапазоне – видимой и инфракрасной зоне электромагнитного спектра.

Загрязнители в снежном покрове существенно меняют отражательные свойства снега в видимом и ближнем инфракрасном участках электромагнитного спектра. Чистый снег большую часть солнечного излучения отражает и практически ничего не поглощает. Наличие даже небольшого количества загрязнителя в снежном покрове приводит к тому, что увеличивается доля поглощенного солнечного излучения и уменьшается доля отраженного. Для того, чтобы правильно учесть изменение отражения в различных участках спектра, оптимальнее рассчитывать значения альbedo, которое является интегральной характеристикой отражательной способности объектов местности в широкой полосе видимого и инфракрасного диапазонов. Отдельные спектральные каналы могут быть по-разному чувствительны к наличию загрязнителей разного типа. Например, загрязненный пылью снег в синем участке спектра поглощает настолько больше солнечного излучения, что его отражательная способность (альbedo) может уменьшаться на 30 % [Kokhanovsky, 2013].

Применение данных дистанционного зондирования (ДЗ) различного пространственного и спектрального разрешения для задач мониторинга снежно-ледового покрова, в том числе расчетов значений альbedo, начало активно развиваться с 90-х годов XX века.

Большое количество исследований посвящено применению данных низкого пространственного разрешения MODIS для расчета значений альbedo снежно-ледового покрова разных географических областей, главным образом, для решения задач выявления климатических изменений [Wang et al., 2013; Wu et al., 2015; Negi et al., 2016; Chiphang et al., 2017; Malmros et al., 2018; Singh et al., 2018; Davaze et al., 2018]. Меньшее количество работ посвящено использованию материалов космической съемки высокого пространственного разрешения, полученных при помощи съемочной аппаратуры спутников серии Landsat, а также сенсором Sentinel-2/MSI [Wang et al., 2013; Pimentel et al., 2016; Li et al., 2018].

Для решения задач мониторинга загрязненности снежного покрова вследствие промышленного освоения, космические снимки также применяются, но в меньшей степени. В качестве основных методов используют визуальный экспертный анализ [Коновалова, 2017; Прокачева, Усачев, 2006; Prokacheva, Usachev, 2013], расчет производных изображений, включая значения альbedo [Дмитриев, Дмитриев, 2008; Опарин и др., 2014; Рапута, Ярославцева, 2017; Петраков и др., 2019]. В результате визуального анализа обычно выделяют границы распространения загрязнения, а расчеты индексов или значений альbedo могут становиться основой для поиска взаимосвязи с концентрациями загрязняющих веществ [Василевич и др., 2015; Дмитриев, Дмитриев, 2008; Onuchin et al., 2020].

Появление снимков оптического диапазона, получаемых съемочной системой Sentinel-2/MSI, повышают возможности анализа загрязненности снежного покрова по космическим снимкам как с точки зрения пространственного разрешения (10 м – лучшее среди открытых снимков), так и с точки зрения большей периодичности съемки арктической зоны. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность проведения регулярного экологического мониторинга территории и оценки пространственно-временной динамики рассматриваемого явления.

Целью работы является анализ загрязненности снежного покрова для трех промышленных арктических городов (Мурманск, Воркута, Норильск) на основе анализа значений альbedo, рассчитанных по космическим снимкам Sentinel-2/MSI. Кроме непосредственно вычисления значений альbedo на первом этапе работы была выполнена оценка точности расчетов по снимкам Sentinel-2/MSI для двух городских территорий (Москва и Кировск) на основе результатов полевых измерений значений альbedo.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Анализ точности расчетов альbedo* по космическим снимкам Sentinel-2/MSI выполнялся на основе наземных измерений при помощи пиранометра Sp Lite2 производства фирмы Kipp&Zonen. Максимальная погрешность измерения по данным производителя составляет 3%<sup>1</sup>. Наземные измерения альbedo снежного покрова выполнялись для территорий г. Москвы и г. Кировска.

Анализ литературных источников показал, что расчет значений альbedo по космическим снимкам высокого разрешения выполняется главным образом на основе трех формул:

$$\text{Альbedo}_{\text{Knap}} = 0,726*b_3 - 0,322*b_3^2 - 0,015*b_8 + 0,581*b_8^2 \quad (1)$$

[Knap et al., 1999]

$$\text{Альbedo}_{\text{Liang}} = 0,356*b_2 + 0,130*b_4 + 0,373*b_8 + 0,085*b_{11} + 0,072*b_{12} - 0,0018 \quad (2)$$

[Liang, 2000]

$$\text{Albedo}_{\text{DugLeDrew}} = 0.526*1.12b_2 + 0.232b_7 + 0.130*0.63b_7 + 0.112*b_{12} \quad (3)$$

[Duguay, LeDrew, 1992]

где  $b_2$ – $b_{12}$  – спектральные каналы Sentinel-2/MSI:  $b_2$  – 0,490 мкм,  $b_3$  – 0,560 мкм,  $b_4$  – 0,665 мкм,  $b_8$  – 0,842 мкм,  $b_{11}$  – 1,610 мкм,  $b_{12}$  – 2,190 мкм.

По каждой из формул (1) – (3) были рассчитаны значения альbedo. Предварительно для всех отобранных снимков (табл. 1) выполнена атмосферная коррекция при помощи программного модуля sen2cor (<http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>) с учетом двунаправленной функции отражательной способности – BRDF (Bidirectional reflectance distribution function), которая определяет, как солнечный свет отражается от поверхности и учитывает особенности геометрии съемки (направление приходящего излучения и направление отраженного излучения в сторону космического аппарата относительно нормали) [Liang and Strahler, 1994].

Табл. 1. Даты полевых работ и съемки Sentinel-2/MSI  
Table 1. Dates of field work and Sentinel-2 / MSI acquisition

Ключевой район	Даты проведения полевых работ	Дата космической съемки Sentinel-2/MSI
Москва	31.03.2019	31.03.2019
Кировск	07.05.2020	07.05.2020
	24.05.2020	24.05.2020

<sup>1</sup> <https://www.kippzonen.com/Product/9/SP-Lite2-Pyranometer#.YP-21Ogzabg>

Оценка точности рассчитываемых по снимкам Sentinel-2/MSI значений альbedo выполнялась на основе регрессионного анализа в два этапа. В точках наземных измерений по результатам расчета по спутниковым снимкам были получены значения альbedo. На первом этапе рассчитывались разности между наземными измерениями и значениями альbedo, вычисленными по данным Sentinel-2/MSI. Для регрессионного анализа использовались те точки, для которых разность значений между наземными и спутниковыми измерениями по модулю не превышала 0,1. Такое пороговое значение связано с тем, что большие разности характеризуют в большей степени ошибки, связанные с неоднородностью местности в пределах пикселя изображения, а также с возможными краевыми эффектами на границах заснеженных участков. После того, как были оценены разности в значениях альbedo, рассчитывалось уравнение регрессии для выборки, где разность не превысила пороговую величину. На рис. 1 приведены графики линейной регрессии для Кировска и Москвы.

Графики показывают наличие явно выраженной связи наземных и спутниковых измерений альbedo, рассчитанных на основе трех методов (1)–(3), для большинства рассматриваемых географических объектов.

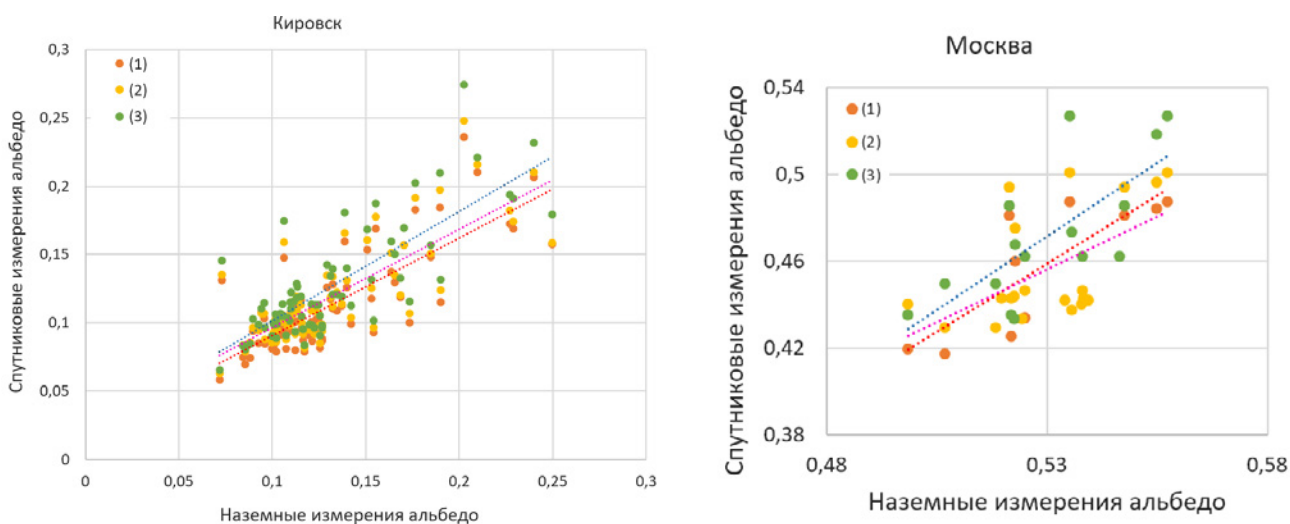


Рис. 1. Графики линейной регрессии для Кировска (слева) и Москвы (справа). Цифрами показаны номера формул, по которым велись расчеты значений альbedo  
 Fig. 1 Linear regression graphs for Kirovsk (left) and Moscow (right).  
 The numbers show the formula number used to calculate the albedo values

В табл. 2 приведена статистическая характеристика данных – объем наземных измерений, полученное уравнение регрессии,  $R^2$  и средняя квадратическая ошибка (СКО).

Проведенный статистический анализ показывает, что максимальное значение  $R^2$  (0,97) наблюдается для территории Москвы. При этом для всех анализируемых методов это значение одинаково. Следует отметить небольшой процент измерений, участвующих в выборке (26%, 57%, 45% для методов (1), (2), (3)), что, вероятно, связано с неоднородностью снежного покрова в весеннее время. Результаты регрессионного анализа для Кировска показывают, что значение коэффициента  $R^2$  при использовании формулы (3) существенно выше значений, полученных при использовании формул (1)–(2). В качестве итогового метода расчета значений альbedo по снимкам Sentinel-2/MSI был выбран метод (3).

Табл. 2. Результаты статистического анализа наземных и спутниковых измерений альбедо  
 Table 2. Results of statistical analysis of ground-based and satellite albedo measurements

Ключевой район	Общее количество точек	Метод расчета значений альбедо	Количество точек, использованных в регрессионном анализе	Уравнение регрессии	R <sup>2</sup>	СКО
Кировск	119	(1)	98(82%)	$y = 0.5356x + 0.2978$	0,58	0,05
		(2)	106(89%)	$y = 0.549x + 0.2918$	0,56	0,06
		(3)	74(62%)	$y = 0.7397x + 0.1686$	0,64	0,05
Москва	42	(1)	11(26%)	$y = 0.9163x - 0.0269$	0,97	0,02
		(2)	24 (57%)	$y = 0.9355x - 0.0399$	0,97	0,02
		(3)	19(45%)	$y = 0.9973x - 0.0572$	0,97	0,03

Таким образом, выполненная оценка точности расчетов показывает, что космические снимки Sentinel-2/MSI предоставляют довольно точные значения альбедо, поэтому их можно использовать для сравнения относительных характеристик альбедо каждого промышленного района.

**Характеристика районов исследования.** Выбранные города – Мурманск, Воркута, Норильск – являются крупными промышленными (Воркута, Норильск) или транспортными центрами (Мурманск), для которых характерно сильное загрязнение городской среды. Для Мурманска таким загрязнителем выступает морской торговый порт, где происходит перевалка угля и его хранение открытым способом [Альмухаметова и др., 2020; Воробьевская, 2020]. В начале 2020 г. вокруг угольных терминалов завершено строительство пылезащитного экрана, который соорудили в последние годы для защиты города от угольной пыли. Было возведено 1,5 км ветропылезащитных экранов общей длиной 1896 м и высотой 20 м. В настоящий момент научные исследования, посвященные изучению эффективности построенного экрана по космическим снимкам, не проводились, поэтому одной из целей авторов в представленной работе является выполнить такой анализ и оценить, снизилась ли загрязненность снежного покрова.

Для Воркуты основными загрязняющими предприятиями являются угольные шахты компании ОАО «Воркутауголь». Открытые склады угля, породные отвалы, угольно-зольные выбросы являются источниками пыли, которая оседает, в том числе, и в городской среде. Объем выбросов для Воркуты составляет больше 290 тыс. т в год [Душкова и др., 2011].

В Норильске основными загрязнителями выступают предприятия ГМК «Норильский никель» и Норильский асфальто-бетонный завод [Онучин и др., 2014; Рапута, Ярославцева, 2017]. При этом следует отметить, что источниками пылевого загрязнения снежного покрова, наряду с выбросами предприятий ГМК «Норильский никель», являются продукты дефляции с карьеров, хвостохранилищ и других техногенных объектов [Онучин и др., 2014].

Все выбранные города находятся в разных районах Российской Арктики и характеризуются разными физико-географическими условиями, которые определяют направление и дальность распространения угольной пыли. При выборе космических снимков главными ограничивающими факторами явились наличие облачности и теневых зон, возникающих вследствие условий освещенности и геометрии съемки.

На основе использования формулы (3) были рассчитаны значения альбедо для Мурманска, Воркуты и Норильска для весеннего периода (апрель–май) по снимкам Sentinel-2/MSI за 2016–2020 гг. с пространственным разрешением 10 м. Полученные значения легли в основу пространственно-временного анализа загрязненности снежного покрова и оценки факторов, которые влияют на распространение пылевых шлейфов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Анализ загрязненности снежного покрова г. Мурманск*

На рис. 2 приведен пример карты значений альбедо для Мурманска, а также положение ключевых точек, использованных при анализе. Всего таких карт было построено 22 за период 2016–2020 гг. Для выполнения пространственного анализа был создан набор небольших полигонов (размером 2×2 пикселя), расположенных в разных частях города и на разной абсолютной высоте. Для полигонов вычислялись средние значения альбедо и абсолютной высоты.

Изучение распределения значений альбедо внутри города показывает, что основной шлейф загрязнения распространяется в южном направлении и наблюдается на расстоянии 4 км от морского порта. Для оценки влияния рельефа города на условия перемещения угольной пыли был вычислен коэффициент корреляции между высотой и значениями альбедо для каждого из 22 снимков.

Коэффициенты корреляции лежат в диапазоне 0,4–0,7, что означает наличие зависимости между значениями альбедо и высотой. Таким образом, установлено, что при увеличении высоты местности постепенно увеличиваются значения альбедо. Выше 120 м значения альбедо становятся стабильными и достигают максимумов для выбранной даты. Это означает, что рельеф оказывает существенное влияние на распространение угольной пыли. Для районов, расположенных на 120 м выше морского порта, сильного загрязнения угольной пылью не наблюдается (табл. 3).

*Табл. 3. Средние значения альбедо за 2016–2020 гг. по высотным уровням*  
*Table 3. Average albedo values for 2016–2020 by altitude levels*

Высота, м	Значение альбедо
30	0,12
40	0,13
50	0,13
60	0,18
70	0,25
80	0,21
90	0,33
100	0,34
110	0,38
120	0,39
130	0,42
140	0,44
150	0,41

Анализ карт альбедо за последние 5 лет показал, что в конце апреля–начале мая 2019–2020 гг., по сравнению с аналогичными периодами предыдущих годов, значения альбедо выросли (в среднем на 0,1–0,3). Особенно это заметно для участков, которые находятся близко к порту. Вероятно, это связано с установкой пылезащитного экрана, который оказал благоприятное влияние на уменьшение загрязнения городской среды. На рис. 3 показаны графики изменения среднего значения альбедо для участков, расположенных вблизи угольного порта и вдали от него.

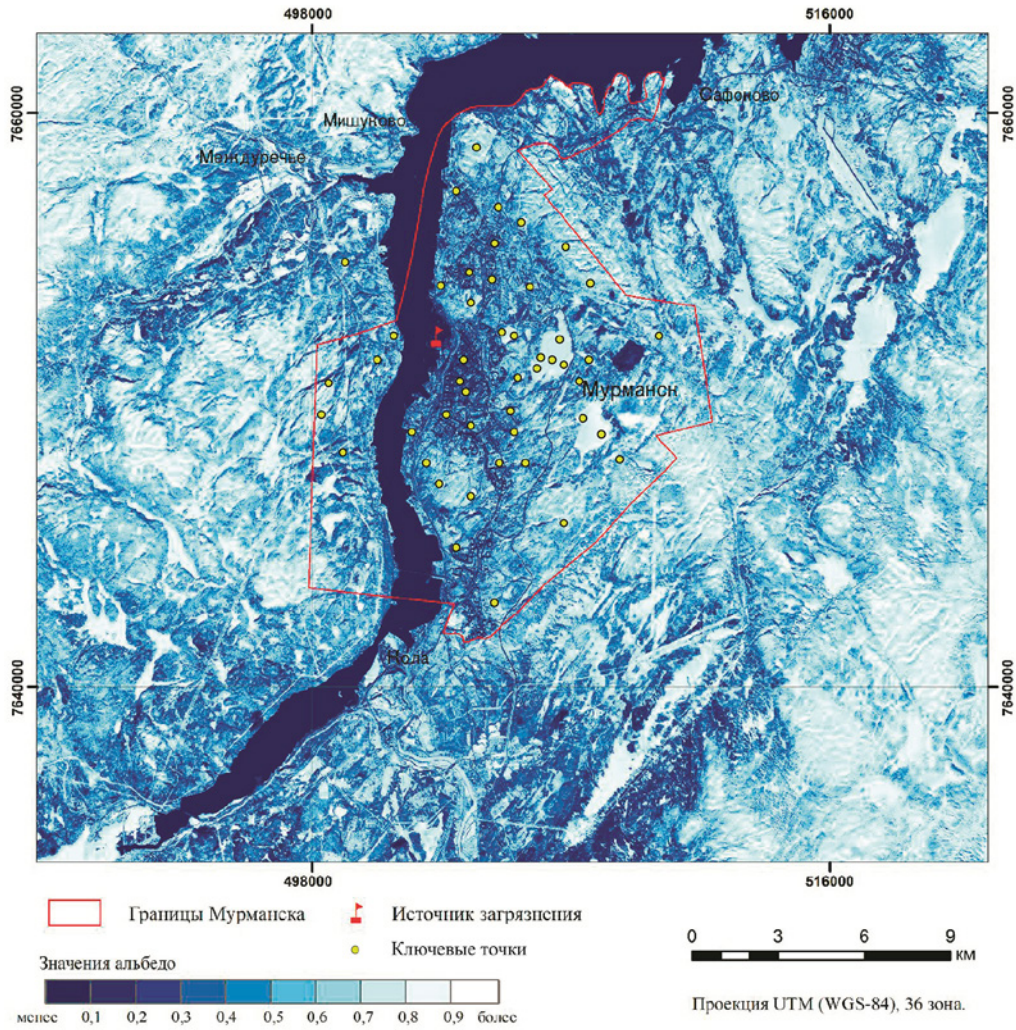


Рис. 2. Пример карты альbedo для г. Мурманск за 10.04.2020  
 Fig. 2. Albedo map for Murmansk, 10.04.2020

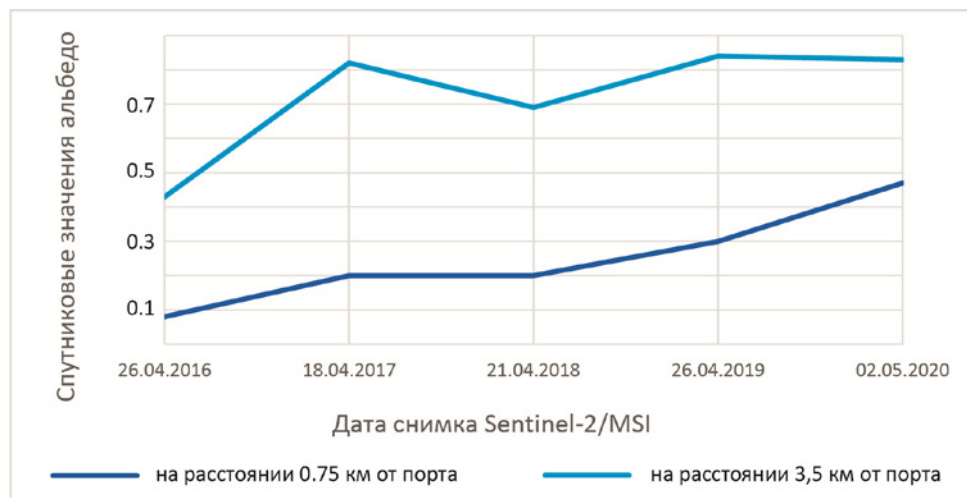


Рис. 3. Многолетняя динамика средних значений альbedo для г. Мурманск  
 Fig. 3. Long-term dynamics of average albedo values for Murmansk



### Анализ загрязненности снежного покрова г. Воркута

Изучение значений альbedo за 5 лет для Воркуты и промышленных зон, расположенных за пределами города, показало, что явной динамики увеличения или уменьшения степени загрязненности снежного покрова угольной пылью за рассматриваемый период (2016–2020 гг.) нет. На рис. 4 приведены графики многолетней динамики средних значений альbedo участков, расположенных на разном расстоянии от загрязнителей.

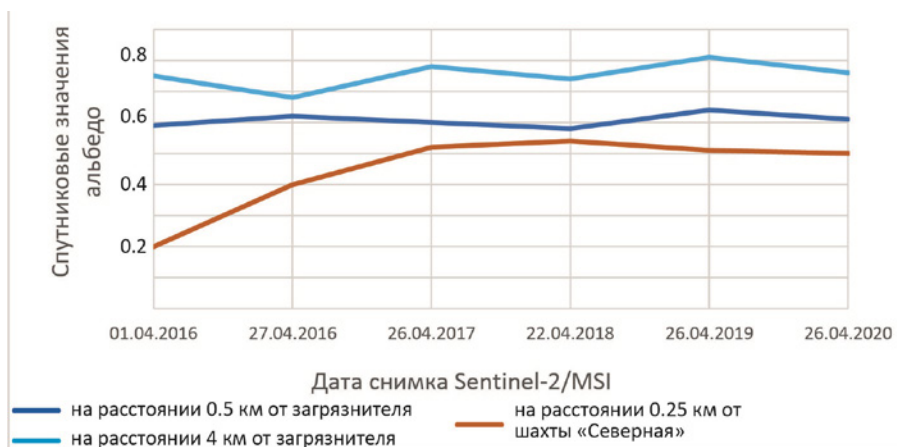


Рис. 4. Многолетняя динамика средних значений альbedo для г. Воркута  
 Fig. 4. Long-term dynamics of average albedo values for Vorkuta

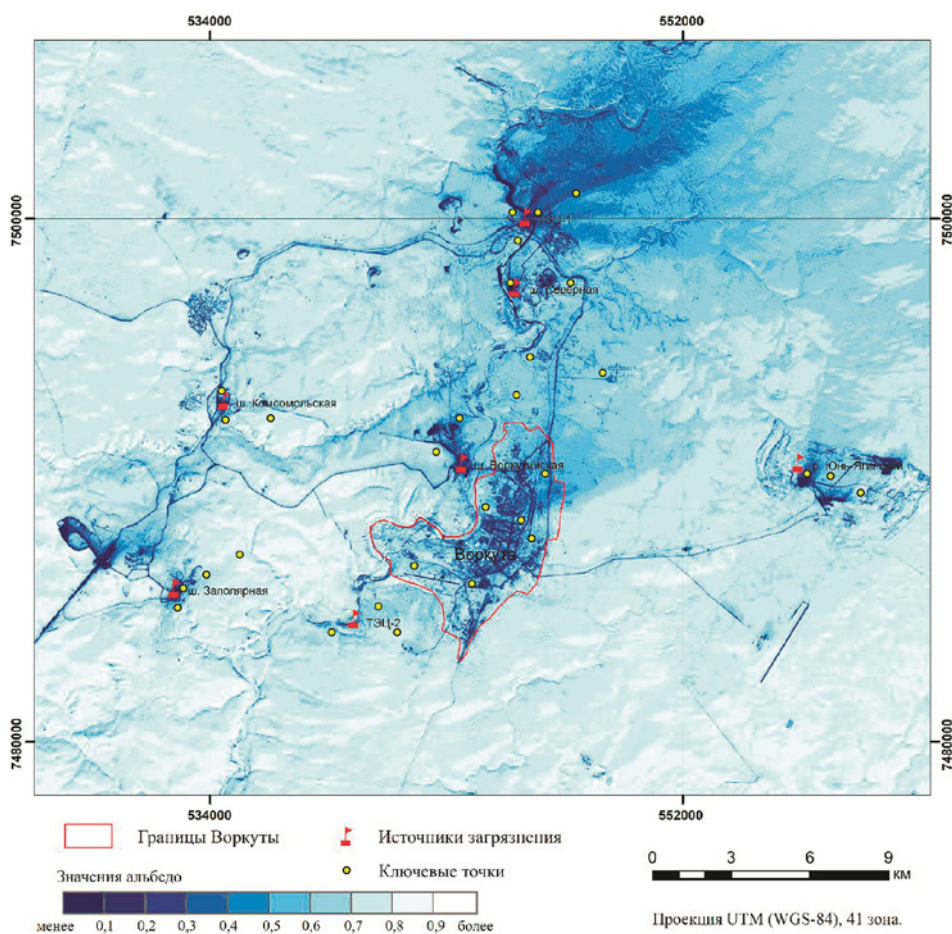


Рис. 5. Карта альbedo для г. Воркута от 21.04.2016 г.  
 Fig. 5. Albedo map for Vorkuta, 21.04.2016

Загрязненность снежного покрова наблюдается около источников загрязнения – двух теплоэлектростанций (ТЭЦ), шахты Воркутинская и угольного разреза Юнь-Ягинский. В отличие от Мурманска угольная пыль распространяется на небольшие расстояния (до 4 км), что связано с несильными ветрами в это время года.

По данным за 2016 г. наблюдается высокая загрязненность снежного покрова. Это связано с тем, что 25 февраля 2016 г. на шахте «Северная» произошел взрыв метана и угольной пыли, что и привело к существенному увеличению загрязненности снежного покрова. На рис. 5 приведена карта от 21 апреля 2016 г., которая демонстрирует районы окрестностей Воркуты, основные загрязнители региона и положение ключевых точек, использованных при анализе.

### **Анализ загрязненности снежного покрова г. Норильск**

Если в Мурманске и Воркуте основными загрязнителями выступает угольная пыль, то в Норильске – предприятия ГК «Норникель» и асфальто-бетонный завод. Вещества, поступающие от рассматриваемых промышленных объектов в атмосферу, в виде пыли осаждаются на подстилающую поверхность. В результате анализа составленных карт альбедо установлено, что шлейф примесей с рассматриваемых предприятий наблюдается на расстоянии до 10 км. За рассматриваемый промежуток времени (2017–2020 гг.) динамики в площадной характеристике рассматриваемых площадей загрязненного снега не наблюдается. На рис. 6 приведен пример карты альбедо от 22 апреля 2017 г. с положением ключевых точек, использованных при анализе, а на рис. 7 – графики многолетней динамики средних значений альбедо участков, расположенных на разном расстоянии от загрязнителей.

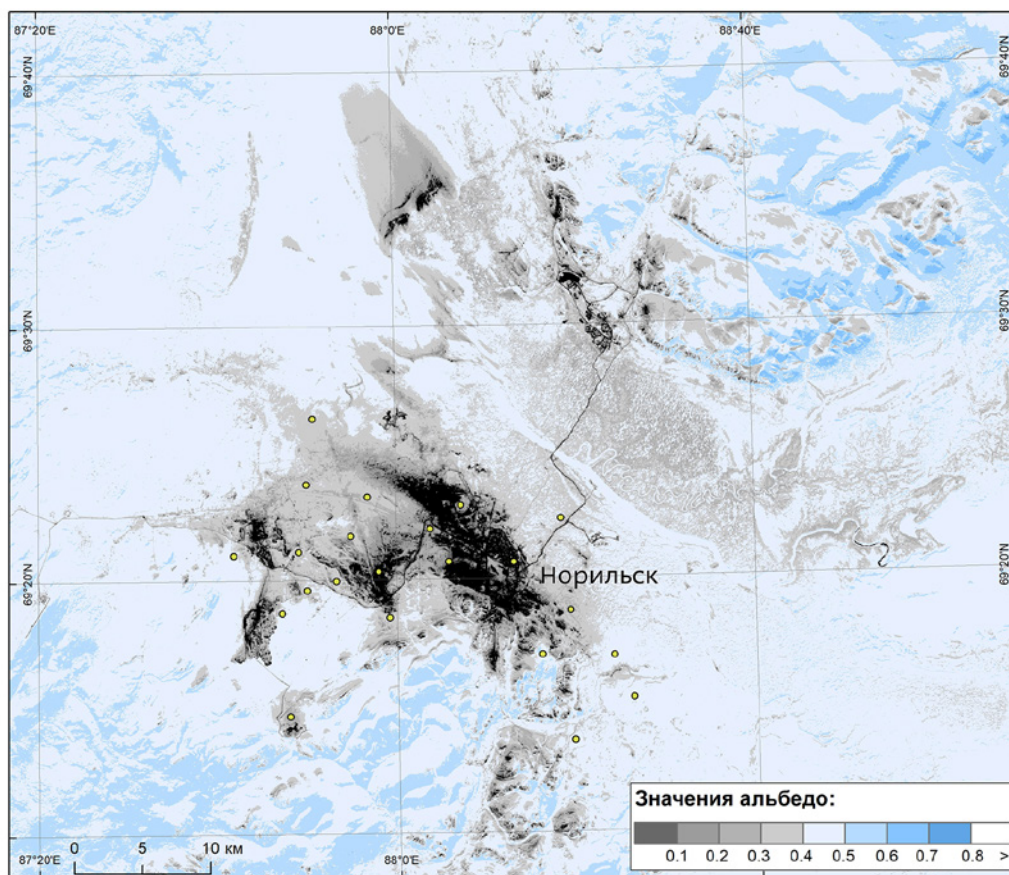
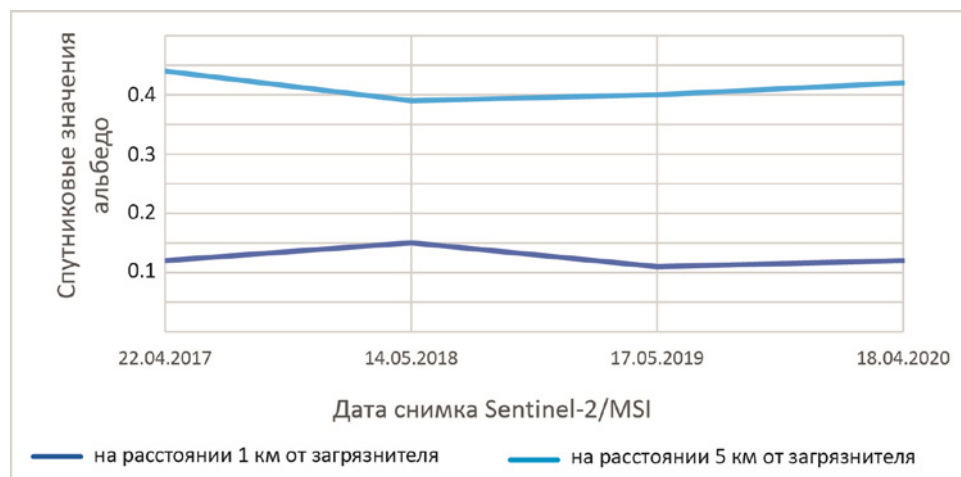


Рис. 6. Значения альбедо, рассчитанные по снимку Sentinel-2/MSI от 22 апреля 2017 г.  
Fig. 6. Albedo values calculated based on Sentinel-2/MSI image of April 22, 2017



*Рис. 7. Многолетняя динамика средних значений альбедо для г. Норильск*  
*Fig. 7. Long-term dynamics of average albedo values for Norilsk*

Полученные результаты работы согласуются с результатами других научных групп, которые в своих исследованиях используют не только анализ космических снимков, но и наземные измерения концентраций загрязняющих веществ. Таким образом, работа продемонстрировала, что космические снимки Sentinel-2/MSI могут быть использованы как самостоятельный источник о загрязненности снежного покрова промышленных городов Арктики.

## ВЫВОДЫ

В результате работы проанализирован архив снимков Sentinel-2/MSI за 2016–2020 гг. для выявления пространственно-временной динамики загрязненности снежного покрова трех промышленных арктических городов России. Анализ показал явное улучшение состояния городской среды только для г. Мурманск, где, вследствие установки пылезащитного экрана, снизилось загрязнение угольной пылью. В работе установлено, что для Мурманска наблюдается следующая закономерность: при высоте более 120 м значения альбедо соответствуют максимальным значениям для выбранной даты, что говорит о том, что угольная пыль распространяется для территорий, расположенных на высотах менее 100 м. Для Воркуты и Норильска многолетней динамики значений альбедо выявить не удалось, а загрязненный снежный покров наблюдается на расстоянии до 5 и 10 км соответственно от предприятий-загрязнителей.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60221.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 18-05-60221.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альмухаметова С.Г., Орлов Ф.А., Гендлер С.Г. Анализ проблем хранения угольного сырья открытым способом. XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2020. Т. 9. № 2. С. 55–58.
2. 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. С. 50–60.
3. Воробьевская Е.Л., Седова Н.Б. Социально значимые проблемы города Мурманска: загрязнение угольной пылью. Материалы докладов Общероссийской научно-практической конференции «Инженерно-экологические изыскания – нормативно-правовая база, современные методы и оборудование», 14–15 сентября 2020 г. С. 9–12.
4. Дмитриев А.В., Дмитриев В.В. Корреляция динамики снеготаяния и содержания пылевых веществ в снегу вокруг г. Омска. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 84–91.
5. Душкова Д.О., Евсеев А.В. Анализ техногенного воздействия на геосистемы Европейского Севера России. Арктика и Север. 2011. № 4. С. 1–34.
6. Коновалов Т.И. Геосистемные исследования и картографирование качества окружающей среды урбанизированных территорий. Известия Иркутского государственного университета. 2017. Т. 22. С. 41–60.
7. 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. № 6. С. 1025–1037.
8. Опарин В.Н., Потапов В.П., Гиниятуллина О.Л. О комплексной оценке состояния окружающей среды по данным дистанционного зондирования Земли в регионах с высокой техногенной нагрузкой. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 6. С. 199–209.
9. Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Шпунтова А.М., Коваленко Н.В., Усубалиев Р.А., Азисов Э.А., Михайлюкова П.Г. Оценка альbedo ледников массива Ак-Шийрак (Тянь-Шань) по наземным данным и снимкам со спутников Landsat. Криосфера Земли. 2019. Т. 23. № 3. С. 13–24.
10. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Северо-западный федеральный округ России. Загрязненные земли по городским поселениям и районам, в речных и озерных водосборах. СПб., 2006. С. 30–36.
11. Рапуга В.Ф., Ярославцева Т.В. Модели и методы наземного и спутникового мониторинга загрязнения снежного покрова в окрестностях промышленных предприятий. Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. 2017. С. 98–107.
12. Davaze A., Rabatel A., Arnaud Y., Sirguey P., Six D., Leterguilly A., Dumont M. Monitoring glacier albedo as a proxy to derive summer and annual surface mass balances from optical remote-sensing data. The Cryosphere. 2018. No. 12. P. 271–286.
13. Duguay C.R., LeDrew E.F. Estimating surface reflectance and albedo over rugged terrain from Landsat-5 Thematic Mapper over Rugged Terrain. Photogrammetric Eng. and Remote Sensing. 1992. V. 58. No. 5. P. 551–558.
14. Knap W.H., Reijmer C.H., Oerlemans J. Narrowband to broadband conversion of Landsat TM glacier albedos. International Journal of Remote Sensing. 1999. No. 20. P. 2091–2110.
15. Kokhanovsky A. Spectral reflectance of solar light from dirty snow: a simple theoretical model and its validation. The Cryosphere. 2013. No. 7. P. 1325–1331.
16. Li Zh., Erb A., Sun Q., Liu Y., Shuai Y., Wang Zh., Boucher P., Schaaf C. Preliminary assessment

of 20-m surface albedo retrievals from Sentinel-2 surface reflectance and MODIS/VIIRS surface anisotropy measures. *Remote Sensing of Environment*. 2018. No. 217. P. 352–365.

17. *Liang S., Strahler A.H.* Retrieval of surface BRDF from multiangle remotely sensed data. *Remote Sensing Environment*. 1994. No. 50. P. 18–30.

18. *Liang S.* Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: I Algorithms. *Remote Sensing of Environment*. 2000. No. 76. P. 213–238.

19. *Malmros J.K., Mernild S.H., Wilson R., Tagesson T., Fensholt R.* Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 209. P. 240–252.

20. *Naegeli K., Huss M., Hoelzle M.* Change detection of bare-ice albedo in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 2019. No. 13. P. 397–412.

21. *Negi H.S., Datt P., Thakur N.K., Ganju A., Bhatia V.K., Kumar G.V.* Observed spatio-temporal changes of winter snow albedo over the north-west Himalaya. *International Journal of Climatology*. 2016. V. 37. No. 5. P. 2304–2317.

22. *Onuchin A., Kofman G., Zubareva O., Danilova I.* Using an urban snow cover composition-based cluster analysis to zone Krasnoyarsk town (Russia) by pollution level. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2020. V. 29. No. 6. P. 4257–4267.

23. *Pimentel R., Aguilar C., Herrero J., Perez-Palazon M.J., Polo M.J.* Comparison between snow albedo obtained from Landsat TM, ETM+ Imagery and the SPOT VEGETATION albedo product in a Mediterranean mountainous site. *Hydrology*. 2016. V. 3. No. 10. P. 3–19.

24. *Prokacheva V.G., Usachev V.F.* Snow cover as an indicator of cumulative man-made pollution in the area of influence of cities and roads. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013. V. 38. No. 3. P. 206–2015.

25. *Singh D.K., Gusain H.S., Mishra V.D., Gupta N.* Automated retrieval of snow/ice surface broadband albedo in Beas river basin, India, using Landsat-8 satellite images and validation with wireless sensor network data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2018.

26. *Wang D., Liang S., He T., Yu Yu.* Direct estimation of land surface albedo from VIIRS data: algorithm improvement and preliminary validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. V. 118. P. 12577–12586.

27. *Wu X., Wang N., Lu A., Pu J., Guo Zh., Zhang H.* Variations in albedo on Dongkemadi glacier in Tanggula Range on the Tibetan Plateau during 2002–2012 and its linkage with mass balance. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*. 2015. V. 47. No. 2. P. 281–292.

## REFERENCES

1. *Almukhametova S.G., Orlov F.A., Gendler S.G.* Analysis of the problems of storing coal raw materials in an open way. XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2020. V. 9. No. 2. P. 55–58.

2. *Davaze A., Rabatel A., Arnaud Y., Sirguey P., Six D., Leterguilly A., Dumont M.* Monitoring glacier albedo as a proxy to derive summer and annual surface mass balances from optical remote-sensing data. *The Cryosphere*. 2018. No. 12. P. 271–286.

3. *Dmitriev A.V., Dmitriev V.V.* Correlation of the dynamics of snowmelt and the content of dust substances in the snow around the city of Omsk. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2008. Vyp. 5. V. 1. P. 84–91.

4. *Duguay C.R., LeDrew E.F.* Estimating surface reflectance and albedo over rugged terrain from Landsat-5 Thematic Mapper over Rugged Terrain. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*. 1992. V. 58. No. 5. P. 551–558.

5. *Dushkova D.O., Evseev A.V.* Analysis of technogenic impact on geosystems of the European North of Russia. *Arctica and North-2011*. No. 4. P. 1–34.

6. *Knap W.H., Reijmer C.H., Oerlemans. J.* Narrowband to broadband conversion of Landsat TM glacier albedos. *International Journal of Remote Sensing*. 1999. No. 20. P. 2091–2110.
7. *Kokhanovsky A.* Spectral reflectance of solar light from dirty snow: a simple theoretical model and its validation. *The Cryosphere*. 2013. No. 7. P. 1325–1331.
8. *Konovalov T.I.* Geosystem research and mapping of the environmental quality of urbanized territories. *The Bulletin of Irkutsk State University*. 2017. V. 22. P. 41–60.
9. *Li Zh., Erb A., Sun Q., Liu Y., Shuai Y., Wang Zh., Boucher P., Schaaf C.* Preliminary assessment of 20-m surface albedo retrievals from Sentinel-2 surface reflectance and MODIS/VIIIRS surface anisotropy measures. *Remote Sensing of Environment*. 2018. No. 217. P. 352–365.
10. *Liang S., Strahler A.H.* Retrieval of surface BRDF from multiangle remotely sensed data. *Remote Sensing Environment*. 1994. No. 50. P. 18–30.
11. *Liang S.* Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: I Algorithms. *Remote Sensing of Environment*. 2000. No. 76. P. 213–238.
12. *Malmros J.K., Mernild S.H., Wilson R., Tagesson T., Fensholt R.* Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 209. P. 240–252.
13. *Naegeli K., Huss M., Hoelzle M.* Change detection of bare-ice albedo in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 2019. No. 13. P. 397–412.
14. *Negi H.S., Datt P., Thakur N.K., Ganju A., Bhatia V.K., Kumar G.V.* Observed spatio-temporal changes of winter snow albedo over the north-west Himalaya. *International Journal of Climatology*. 2016. V. 37. No. 5. P. 2304–2317.
15. *Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trefilova O.V., Danilova I.V.* Pollution of the snow cover in the impact zone of enterprises of the Norilsk Industrial district. 2014. No. 6. P. 1025–1037.
16. *Onuchin A., Kofman G., Zubareva O., Danilova I.* Using an urban snow cover composition-based cluster analysis to zone Krasnoyarsk town (Russia) by pollution level. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2020. V. 29. No. 6. P. 4257–4267.
17. *Oparin V.N., Potapov V.P., Giniyatullina O.L.* On a comprehensive assessment of the state of the environment based on data from remote sensing of the Earth in regions with a high technogenic load. 2014. No. 6. P. 199–209.
18. *Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Shpuntova A.M., Kovalenko N.V., Usabaliev R.A., Azisov E.A., Mikhailyukova P.G.* Estimation of the albedo of glaciers of the Ak-Shiyarak massif (Tien Shan) based on ground data and images from Landsat satellites. *Earth's Cryosphere*. 2019. V. 23. No. 3. P. 13–24.
19. *Pimentel R., Aguilar C., Herrero J., Perez-Palazon M.J., Polo M.J.* Comparison between snow albedo obtained from Landsat TM, ETM+ Imagery and the SPOT VEGETATION albedo product in a Mediterranean mountainous site. *Hydrology*. 2016. V. 3. No. 10. P. 3–19.
20. *Prokacheva V.G., Usachev V.F.* North-Western Federal District of Russia. Polluted land by urban settlements and districts, in river and lake catchments. St. Petersburg: 2006. P. 30–36.
21. *Prokacheva V.G., Usachev V.F.* Snow cover as an indicator of cumulative man-made pollution in the area of influence of cities and roads. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013. V. 38. No. 3. P. 206–2015.
22. *Raputa V.F., Yaroslavtseva T.V.* Models and methods of ground and satellite monitoring of snow cover pollution in the vicinity of industrial enterprises. *Water and environmental problems of Siberia and Central Asia*. 2017. P. 98–107.
23. *Singh D.K., Gusain H.S., Mishra V.D., Gupta N.* Automated retrieval of snow/ice surface broadband albedo in Beas river basin, India, using Landsat-8 satellite images and validation with wireless sensor network data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2018.

24. *Vasilevich M.I., Shchanov V.M., Vasilevich R.S.* Application of satellite research methods in the assessment of snow cover pollution around industrial enterprises in the tundra zone. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space.* 2015. V. 12. P. 50–60.
  25. *Vorobyevskaya E.L., Sedova N.B.* Socially significant problems of the city of Murmansk: coal dust pollution. *Materials of reports of the All-Russian scientific and practical conference «Engineering and environmental surveys-regulatory and legal base, modern methods and equipment»,* September 14–15, 2020. P. 9–12.
  26. *Wang D., Liang S., He T., Yu Yu.* Direct estimation of land surface albedo from VIIRS data: algorithm improvement and preliminary validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2013. V. 118. P. 12577–12586.
  27. *Wu X., Wang N., Lu A., Pu J., Guo Zh., Zhang H.* Variations in albedo on Dongkemadi glacier in Tanggula Range on the Tibetan Plateau during 2002–2012 and its linkage with mass balance. *Arctic, Antarctic and Alpine Research.* 2015. V. 47. No. 2. P. 281–292.
-