

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Г. П. Стручкова<sup>1</sup>, Т. Г. Крупнова<sup>2</sup>, С. А. Тихонова<sup>1</sup>, Т. А. Капитонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера  
им. В. П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия;

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация:** Снежный покров является эффективным накопителем поллютантов, а концентрация загрязняющих веществ в снеге обычно на два-три порядка выше, чем в атмосферном воздухе. По химическому составу снега можно установить распределение количественных характеристик вещества по площади, которое осаждается из атмосферы в зимний период. Благодаря этому можно выявить источники загрязнения и ареалы их влияния, получить ориентировочную оценку количества токсикантов, которые можно фиксировать, и наблюдать за изменениями с помощью дешифрирования спутниковой информации. Был исследован снежный покров в районе расположения угольных разрезов возле г. Нерюнгри с использованием разновременных снимков спутника Landsat. Дешифрирование проводилось на программном комплексе ENVI, изменения состояния снежного покрова оценивались при помощи характеристик спектральных кривых. Результаты проведённых исследований показывают, что использование спектральных характеристик позволяет проводить оценку динамики и интенсивности загрязнения снежного покрова по разновременным спутниковым изображениям. Использование космических снимков даёт возможность осуществлять оперативный мониторинг изменения экологической ситуации в труднодоступных районах и хорошо дополняет наземные наблюдения.

**Ключевые слова:** угольная пыль, угольный разрез, спектральная кривая, дешифрирование, спутниковые данные, геотехнический мониторинг, снежный покров, ENVI.

**Для цитирования:** Стручкова Г. П., Крупнова Т. Г., Тихонова С. А., Капитонова Т. А. Исследование загрязнения снежного покрова угледобывающих районов с использованием спектральных характеристик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12-1. – С. 195–203. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_121\_0\_195.

### Snow cover pollution analysis in coal mining regions using color response curves

G. P. Struchkova<sup>1</sup>, T. G. Krupnova<sup>2</sup>, S. A. Tichonova<sup>1</sup>, T. A. Kapitonova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FRC "The Yakut Scientific Centre of SB RAS", Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia;

<sup>2</sup> Chemistry Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract:** Snow cover is a potent accumulator of pollutants. Such pollutants build up in snow cover for the whole winter at concentrations 2–3 orders of magnitude higher than in atmospheric air. Based on the chemistry of snow, it is possible to determine areal distribution of quantitative characteristics of pollutants which settle from the atmosphere in winter. This enables detection of the pollution sources and their influence zones, and to approximately assess the number of toxicants traceable in decoded satellite images. We studied snow cover in the area of open pit coal mining at Neryungri using different time satellite images Landsat. Interpretation of the images was implemented in ENVI, and the change in the condition of snow cover was traced using color response curves. The studies show that the color response curves make it possible to estimate dynamics and intensity of snow cover pollution using different time satellite images. The satellite images enable real-time monitoring of ecological situation in the remote areas and compliment ground-based observations.

**Key words:** coal dust, open pit coal mine, color response curve, interpretation, satellite data, geotechnical monitoring, snow cover, ENVI.

**For citation:** Struchkova G. P., Krupnova T. G., Tichonova S. A., Kapitonova T. A. Snow cover pollution analysis in coal mining regions using color response curves. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12-1):195–203. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_121\_0\_195.

## Введение

Динамика снеготаяния используется в качестве индикатора при исследованиях климатических и экологических процессов, для определения зон промышленного загрязнения пылевыми и сажевыми выбросами [1]. Методы, основанные на дешифрировании разновременных спутниковых снимков для оценки загрязнения снежного покрова и антропогенного воздействия рассматриваются во многих работах как российских, так и зарубежных авторов [2–9]. Использование данных дистанционного зондирования (ДДЗ) в практике выделения ареалов загрязнений, наблюдаемых вокруг промышленных объектов, чаще всего основано на анализе взаимосвязи процессов снеготаяния с распределением осажденных из атмосферы взвешенных частиц на снежный покров. Наиболее благоприятные условия для выявления загрязненных участков складываются весной, когда наблюдается быстрое снижение коэффициента спектральной яркости снежного покрова [10–11]. Динамика и пространственные особенности весеннего схода снега косвенно

несут в себе информацию о загрязнении снежного покрова и почвы загрязнителями. В зонах повышенного загрязнения протаивание снежного покрова происходит на 3–10 дней раньше, чем на чистых участках [12]. В качестве индикатора загрязнения земной поверхности используется снеговой покров, обладающий свойством интегрального накопления загрязняющих веществ.

Аккумулируемые в снеговом покрове ингредиенты сохраняются до снеготаяния и, таким образом, несут в себе значительную геохимическую информацию [13, 14].

В данной работе целью является использование дешифрирования космоснимков методом спектрального анализа для оценки загрязнения снежного покрова в угледобывающих районах. Объектом применимости данных методов цифровой обработки космических изображений выбран Нерюнгринский угольный разрез. Главные преимущества применения ДЗЗ — это относительно высокая скорость получения данных на больших площадях земной поверхности, а также возможность получения информации об объ-

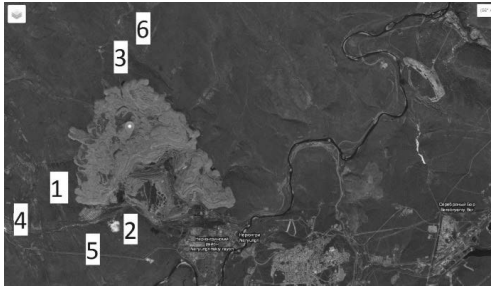


Рис. 1. Нерюнгринский угольный разрез и исследованные участки на карте  
 Fig. 1. Neryungri coal mine and the studied areas on the map

ектах, практически недоступных для исследования другими способами и методами.

### Материалы и методы

Спектральные характеристики пространственных объектов дают более тонкий по сравнению с визуальным дешифрированием анализ о состоянии и свойствах объекта. В совокупности данные характеристики позволяют идентифицировать пространственные объекты загрязнений на снимках и следить за динамикой их изменения, про-

гнозировать распространение загрязняющих веществ [15].

Исследованы разновременные снимки со спутника Landsat 5, 7 и 8. Интервал по времени брался за март 2005, 2009, 2011, 2015, 2019 годов. Для обработки снимков и оценки спектральной характеристики использовался программный комплекс ENVI. Предметом исследования была выбрана территория Нерюнгринского угольного бассейна.

Нерюнгринский угольный разрез — крупнейшее в России месторождение коксующегося угля Алдано-Чульманского угленосного района Южно-Якутского угольного бассейна Республики Саха (Якутия). Открыт в 1951 году на Нерюнгринском месторождении. В 1964 году 1 ноября на разрезе «Нерюнгра» был поднят первый ковш угля. 1 января 1975 года участок «Нерюнгра» преобразован в разрез «Нерюнгринский». В 1985 году мощность достигла 11 млн т угля. В 1987—1990 гг. мощность добычи подошла к 15 млн т угля в год, а 24 мая 2000 года добыта 200 млн тонна угля.

Роза ветров в Нерюнгри

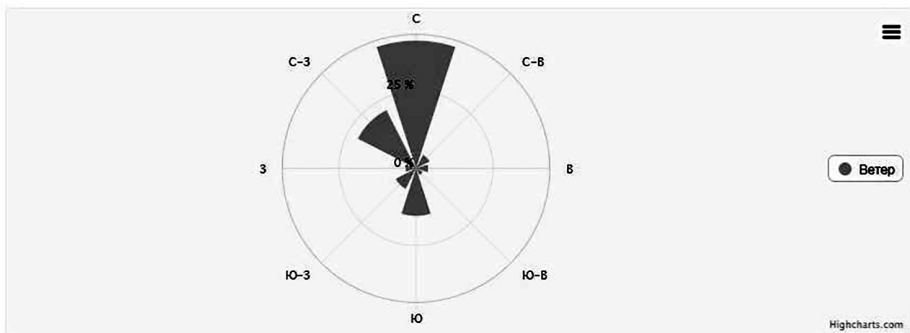


График ветра (направление - откуда дует ветер) в Нерюнгри, с усредненными значениями согласно нашим данным.

С ▾	С-В ▲	В ◀	Ю-В ▾	Ю ▲	Ю-З ◀	З ▶	С-З ▲
Северный	Северо-Восто...	Восточный	Юго-Восточный	Южный	Юго-Западный	Западный	Северо-Запад...
41.4%	4.9%	3.9%	2.4%	15.4%	7.4%	3.4%	21.2%

Рис. 2. Роза ветров в Нерюнгринском районе  
 Fig. 2. The wind rose in the Neryungri district

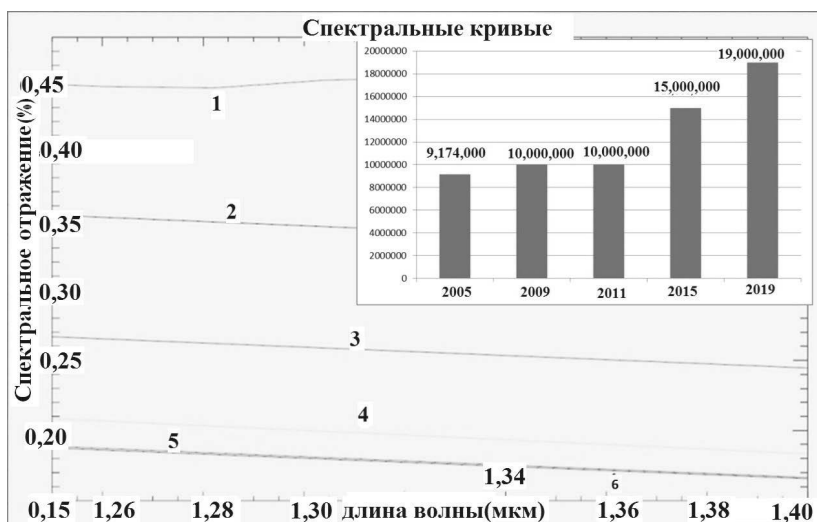


Рис. 3. Спектральные кривые 1 участка возле Нерюнгринского угольного разреза: 1 – спектр «нормального» снега, 2 – 2005 г., 3 – 2009 г., 4 – 2011 г., 5 – 2015 г., 6 – 2019 г.  
 Fig. 3. Spectral curves of the 1st section near the Neryungri coal mine: 1 – the spectrum of «normal» snow, 2 – 2005., 3 – 2009, 4 – 2011, 5 – 2015 year, 6 – 2019

С 2004 года согласно долгосрочной программе развития разрез начал увеличение объемов добычи угля. В составе Нерюнгринского месторождения около 20 пластов. Большинство из них выходит на поверхность, что позволяет добывать уголь открытым способом на крупных карьерах. В данное время угольный разрез находится в разработке.

За эталон была выбрана спектральная кривая «нормального» снега из спектральной библиотеки программного комплекса ENVI. Исследования проводились по снимкам со спутника Landsat 5, 7 и 8 в период начала снеготаяния, за март месяц 2005–2019 гг. Для исследования загрязнения снежного покрова вокруг угольного разреза применялся метод спектрального анализа на программном комплексе ENVI. Проведена радиометрическая и атмосферная коррекция, затем сделана классификация с обучением методом спектрального угла. Для каждого года было исследовано по 3–4 снимка

и рассчитано среднее значение из 18 проб для каждого спектра. Участки для анализа загрязнения выбирались с учетом розы ветров (рис. 1 и 2), фоновый участок выбран по направлению наименьшего значения к юго-востоку по таблице и 3 участок – по направлению наибольшего значения ветра к югу. Расстояние между участками 1 и 2 составляет примерно 4 км, между участком 2 и 3 – около 8 км. Роза ветров города показывает, ветры каких направлений преобладают в данной местности. Как видно из розы ветров, основным направлением ветра в городе Нерюнгри является северный (41%), северо-западный (21%) и южный (15%). Самые редкие направления ветра в городе – восточный (3,9%) и западный (3,4%).

### Результаты и обсуждение

Предложенный метод позволяет определять зоны и степень загрязнения с применением метода спектрального анализа. На рис. 3 представлена

динамика изменений спектральных кривых снежного покрова на участке 1 Нерюнгринского угольного разреза за 2005, 2009, 2011, 2015 и 2019 годы; в правом верхнем углу графика размещена диаграмма увеличения мощности добычи угля на Нерюнгринском угольном разрезе в рассмотренный период времени.

На оси ординат представлено значение коэффициента спектральной яркости — отношение монохроматических яркостей объекта и идеальной отражающей поверхности, измеряемые при одинаковых условиях.

На графике видно снижение значений спектральной кривой снега возле угольного разреза с течением времени. Это объясняется увеличением добычи угля, и, соответственно, увеличением выбросов угольной пыли. Яркость спектра снежного покрова уменьшается

в зависимости от степени его загрязнения [15].

Также были выбраны 6 участков с учетом направления розы ветров на ровной безлесной местности, 1–2–3 участки поближе и 4–5–6 участки подальше от границы разреза. Расстояние участков 1–2–3 от источника составляет в среднем примерно 1,2 км, расстояние участков 4–5–6 от источника — в среднем около 2,6 км. Расстояние между участками 1–2–3 в среднем 500 м, расстояние между участками 4–5–6 в среднем 900 м, между участками 1–2–3 и 4–5–6 расстояние в среднем 1,2 км.

На рис. 4 представлен график сравнения загрязнения на участках возле Нерюнгринского угольного разреза за февраль и за март месяц на 6 участках за 2009 год. Максимальные

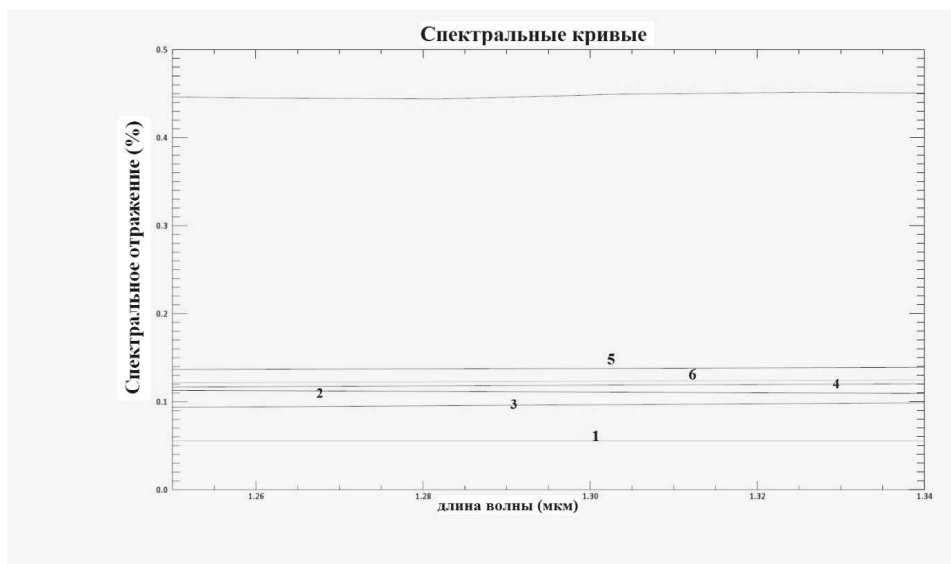


Рис. 4. Спектральные кривые 2009 г. по 6 участкам возле Нерюнгринского угольного разреза: зеленым цветом обозначен спектр «нормального» снега; 1, 2, 3 — это участки по розе ветров поближе к источнику; 4, 5, 6 — участки по розе ветров подальше от источника

Fig. 4. Spectral curves of 2009 for 6 sites near the Neryungrinsky coal mine: the spectrum of «normal» snow is indicated in green; 1, 2, 3 are areas along the wind rose closer to the source; 4, 5, 6 are areas along the wind rose away from the source

уровни загрязнения территории угольной пылью соответствуют направлениям розы ветров и расстоянию от границ угольной разреза. Максимальный уровень загрязнения превышен более четырех раз по сравнению с уровнем эталона «нормального» снега.

Подобное загрязнение не только воздуха, но также почвы и водных ресурсов сказывается на здоровье населения.

Несмотря на снижение объемов добычи угля и золота, экологическая обстановка в районе остается напряженной, это показали исследования лечебно-профилактических организаций г. Нерюнгри за период 2003—2009 гг. Средняя продолжительность жизни женщин — 62,6 лет и мужчин — 51,3 года в 1,2 и 1,1 раза ниже средних показателей по Российской Федерации. За последние годы смертность среди населения г. Нерюнгри также увеличивается. Значительное число людей умирает от болезней системы кровообращения — 58,6%, на втором месте — злокачественные образования 19,8%, [16]. Ухудшение здоровья происходит не только вследствие падения уровня жизни населения, но и под влиянием экологическим проблем.

## Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что использование спектральных характеристик позволяет проводить ориентировочную оценку загрязнения угольной пылью, накапливаемой в снегу, по спутниковым изображениям. Данная методика может быть использована при мониторинге состояния окружающей среды угледобывающих районов. Методика учитывает особенности среды (заболоченность, труднодоступность, отсутствие возможностей проведения наземных исследований) и позволяет выявлять ареалы загрязнения, определять зоны с повышенным содержанием угольной пыли при изучении снежного покрова, накапливающего токсичные вещества в течение зимнего периода, что негативно сказывается на здоровье населения.

Использование космических снимков является одним из этапов геотехнического мониторинга и даёт возможность оперативно получать информацию на большую территорию, что важно для оценки экологической ситуации труднодоступных районов и хорошо дополняет наземные мониторинговые работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев А. В., Дмитриев В. В.* Теоретическое и экспериментальное исследование процесса таяния снежного покрова в районе г. Омска по материалам 2008—2009 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2010. — Т. 7. — № 2. — С. 138—148.
2. *Barcan V., Sylina A.* The appraisal of snow sampling for environmental pollution valuation // Water, Air, and Soil Pollution. — 1996. — V. 89. — P. 49–65. DOI: 10.1007/BF00300421.
3. *Melnikov S. Carrol J., Goshkov A., Vlasov S., Dahle S.* Snow and ice concentrations of selected persistent pollutants in the Ob–Yenisey River watershed // The Science of the Total Environment. — 2003. — No 6. — P. 27–37. DOI: 10.1016/S0048–9697(02)00482–5.
4. *Krupnova T. G., Rakova O. V., Struchkova G. P., Tikhonova S. A., Kapitonova T. A., Gavrilkina S. V., Bulanova A. V., Yakimova O. N.* Insights into Particle-Bound Metal(loid)s

in Winter Snow Cover: Geochemical Monitoring of the Korkinsky Coal Mine Area, South Ural Region, Russia // *Sustainability* 2021, 13, 4596. DOI: 10.3390/su13094596.

5. Jost G., Weiler M., Gluns D. R., Alila Y., 2007. The influence of forest and topography on snow accumulation and melt at the watershed-scale // *Journal of Hydrology*. – 2007. – V. 347. – P. 101–115. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.09.006.

6. Шамрикова Е. В., Ванчинова Е. В., Рязанов М. А., Казаков В. Г. Состояние снежного и почвенного покрова вблизи цементного завода // *Вода: химия и экология*. – 2010. – № 10. С. 46–51.

7. Wenqian Chen, Xin Wang, Jiecan Cui, Xiaoyi Cao, Wei Pu, Xuan Zheng, Haofan Ran, Jinli Ding. Radiative forcing of black carbon in seasonal snow of wintertime based on remote sensing over Xinjiang, China // *Atmospheric Environment*. – 2021. – Vol. 247, 15 February, 118204.

8. Maqbool Ahmad, Khan Alam, Shahina Tariq, Thomas Blaschke. Contrasting changes in snow cover and its sensitivity to aerosol optical properties in Hindukush-Karakoram-Himalaya region // *Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 699, 10 January, 134356.

9. Sahu R., Gupta R. D. Snow cover area analysis and its relation with climate variability in Chandra basin, Western Himalaya, during 2001–2017 using MODIS and ERA5 data // *Environ Monit Assess*. – 2020. – Jul 7; 192(8):489. doi: 10.1007/s10661–020–08442–8.

10. Виноградов Б. В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. – 320 с.

11. Kokhanovsky A. Spectral reflectance of solar light from dirty snow: a simple theoretical model and its validation // *Cryosphere*. – 2013. – No – 7. – Pp. – 1325–1331. DOI: 10.5194/тс-7–1325–2013.

12. Григорьев А. И. Индикация состояния окружающей среды. Омск: ОМИПП. 2003. – 128 С.

13. 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.

14. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2010. – 111 с.

15. Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Андреева Н. В., Счастливец Е. Л., Быков А. А. Оценка пылевого загрязнения атмосферы угледобывающих районов Кузбасса в зимний период по данным дистанционного зондирования земли // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 3. – С. 126–137.

16. Зарипова С. Н., Юданова В. В. Многокритериальная оценка состояния здоровья населения г. Нерюнгри // *Вестн. Технического института (филиал) Северо-Восточного федерального университета*. Вып. 5. – Нерюнгри: Изд-во Технического института. – 2010. – С. 36–48. **ИИЭБ**

## REFERENCES

1. Dmitriyev A. V., Dmitriyev V. V. Teoretical and experimental research of snow melting process around Omsk city on materials of 2008–2009. *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2010. Vol. 7, no. 2, pp. 138–148. [In Russ].

2. Barcan V., Sylina A. The appraisal of snow sampling for environmental pollution valuation. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1996. V. 89. pp. 49–65. DOI: 10.1007/BF00300421.

3. Melnikov S. Carrol J., Goshkov A., Vlasov S., Dahle S. Snow and ice concentrations of selected persistent pollutants in the Ob–Yenisey River watershed. *The Science of the Total Environment*. 2003. no. 6, pp. 27–37. DOI: 10.1016/S0048 – 9697(02)00482-5.
4. Krupnova T. G., Rakova O. V., Struchkova G. P., Tikhonova S. A., Kapitonova T. A., Gavrilkina S. V., Bulanova A. V., Yakimova O. N. Insights into Particle-Bound Metal(loid)s in Winter Snow Cover: Geochemical Monitoring of the Korkinsky Coal Mine Area, South Ural Region, Russia. *Sustainability* 2021, 13, 4596. DOI: 10.3390/su13094596.
5. Jost G., Weiler M., Gluns D. R., Alila Y., 2007. The influence of forest and topography on snow accumulation and melt at the watershed-scale. *Journal of Hydrology*. 2007. Vol. 347, pp. 101–115. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.09.006.
6. Shamrikova E. V., Vanchikova E. V., Ryazanov M. A., Kazakov V. G. State of soil and snow covers near cement plant. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2010, no. 10, pp. 46–51. [In Russ].
7. Wenqian Chen, Xin Wang, Jiecan Cui, Xiaoyi Cao, Wei Pu, Xuan Zheng, Haofan Ran, Jinli Ding. Radiative forcing of black carbon in seasonal snow of wintertime based on remote sensing over Xinjiang, China. *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 247, 15 February, 118204.
8. Maqbool Ahmad, Khan Alam, ShahinaTariq, Thomas Blaschke. Contrasting changes in snow cover and its sensitivity to aerosol optical properties in Hindukush-Karakoram-Himalaya region. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 699, 10 January, 134356.
9. Sahu R, Gupta R. D. Snow cover area analysis and its relation with climate variability in Chandra basin, Western Himalaya, during 2001 – 2017 using MODIS and ERA5 data. *Environ Monit Assess*. 2020 Jul 7; 192(8):489. doi: 10.1007/s10661-020-08442-8.
10. Vinogradov B. V. *Aerokosmicheskij monitoring ekosistem* [Aerospace monitoring of ecosystems]. Moscow: Nauka, 1984, 320 p. [In Russ].
11. Kokhanovsky A. Spectral reflectance of solar light from dirty snow: a simple theoretical model and its validation. *Cryosphere*. 2013, no. 7, pp. 1325–1331. DOI: 10.5194/tc-7-1325-2013.
12. Grigoriev A. I. *Indikaciya sostoyaniya okruzhayushchej sredy* [Indication of the state of the environment]. Omsk: OmIPP, 2003, 128 p. [In Russ].
13. Vasilevich M. I., Shchanov V. M., Vasilevich M. I. Application of satellite methods to assess snow cover pollution around industrial enterprises in the tundra zone. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015. Vol. 12, no. 2, pp. 50 – 60. [In Russ].
14. Tokareva O. S. *Obrabotka i interpretatsiya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Processing and interpretation of Earth remote sensing data]: uchebnoye posobiye. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2010, 111 p. [In Russ].
15. Oparin V. N., Potapov V. P., Giniyatullina O. L., Andreeva N. V., Schastlivtsev E. L., Bykov A. A. Evaluation of dust pollution of air in kuzbass coal-mining areas in winter by data of remote earth sensing. *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50, no 3, pp. 549 – 558.
16. Zaripova S. N., Yudanova V. V. Multicriteria assessment of the health status of the population of Neryungri. *Vestnik Tekhnicheskogo instituta (filial) Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta*. Vyp. 5, Neryungri: Izd-vo Tekhnicheskogo instituta. 2010, pp. 36–48. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стручкова Галина Прокопьевна<sup>1</sup> — канд. техн. наук, вед. научн. сотр., pandoramy8@list.ru;  
Крупнова Татьяна Георгиевна<sup>2</sup> — канд. хим. наук, доцент, krupnovatg@susu.ru;



*Тихонова Сардана Алексеевна*<sup>1</sup> – вед. инженер, <http://orcid.org/0000-0002-5737-2409>, [sardankobeleva@gmail.com](mailto:sardankobeleva@gmail.com);

*Капитонова Тамара Афанасьевна*<sup>1</sup> – канд. физ.-мат. наук, вед. научн. сотр., <http://orcid.org/0000-0001-5502-0998>, [kapitonova@iptpn.ysn.ru](mailto:kapitonova@iptpn.ysn.ru);

<sup>1</sup> ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук. 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия;

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет. 454080, Челябинск, Пр. Ленина 76, Россия.

**Для контактов:** *Стручкова Г. П.*, e-mail: [pandoramy8@list.ru](mailto:pandoramy8@list.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Struchkova G. P.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, [pandoramy8@list.ru](mailto:pandoramy8@list.ru);

*Krupnova T. G.*<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, [krupnovatg@susu.ru](mailto:krupnovatg@susu.ru);

*Tichonova S. A.*<sup>1</sup>, Lead Engineer, [sardankobeleva@gmail.com](mailto:sardankobeleva@gmail.com);

*Kapitonova T. A.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Phys.-mat.), Leading Researcher, [kapitonova@iptpn.ysn.ru](mailto:kapitonova@iptpn.ysn.ru);

<sup>1</sup> FRC “The Yakut Scientific Centre of SB RAS”, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 677980, Yakutsk, Russia;

<sup>2</sup> Chemistry Department, South Ural State University 454080, Chelyabinsk, Russia.

**Corresponding author:** *Struchkova G. P.*, e-mail: [pandoramy8@list.ru](mailto:pandoramy8@list.ru).

Получена редакцией 18.07.2021; получена после рецензии 18.10.2021; принята к печати 10.11.2021.

Received by the editors 18.07.2021; received after the review 18.10.2021; accepted for printing 10.11.2021.

