

Геоинформатика. 2023. № 1. С. 63–70.
Geoinformatika. 2023;(1):63–70.

Геоэкология

Научная статья
 УДК 004.550
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-63-70>

Геоинформационные и дистанционные методы при оценке загрязнения снежного покрова (г. Кызыл)

© 2023 г. — Светлана Алексеевна Чупикова^{а)}, Анатолий Федорович Чульдум^{б)}

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН; Россия, Кызыл
^{а)}s_fom@inbox.ru, ^{б)}tajkinol@gmail.com

Аннотация: В статье отражены результаты использования геоинформационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования (ДДЗ) при отображении и анализе загрязнения снежного покрова городских территорий. Исследования проведены на основе сформированной базы данных. Применение инструментария геоинформационных систем позволяет создавать электронные карты для оценки современного экологического состояния территории, а использование данных ДДЗ упрощает оценку уровня загрязнения. В геоинформационной среде построены тематические карты: уровня загрязнения свинцом (мг/кг)(м²·сутки) по годам, плотности выпадения атмосферной пыли на снежный покров и другие. Оценка загрязнения снежного покрова ДДЗ проведена на базе снимков каталога LANDSAT платформы Google Earth Engine (GEE). Выполнен расчет показателей: *NDSI* — нормализованный разностный индекс, *S3* — нормированный индекс, *SCI* — индекс загрязнения. Выявлена значимая корреляция показателя *NDSI* (или *S3*) с концентрациями Mn, Pb и Zn. Отображение пространственного распределения значений этих показателей произведено методом кригинга с помощью имеющихся открытых модулей и скриптов платформы GEE. Получены карты пространственного распределения основных химических элементов твердого осадка снега и талой воды.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, базы данных, ГИС технологии, снежный покров, показатели, корреляция.

Для цитирования: Чупикова С.А., Чульдум А.Ф. Геоинформационные и дистанционные методы при оценке загрязнения снежного покрова (г. Кызыл) // Геоинформатика. — 2023. — № 1. — С. 63–70. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-63-70>.

Geocology

Original article

Geoinformation and remote methods for assessing snow cover pollution (Kyzyl)

© 2023 — Svetlana A. Chupikova^{а)}, Anatoly F. Chuldum^{б)}

Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS; Kyzyl, Russia
^{а)}s_fom@inbox.ru, ^{б)}tajkinol@gmail.com

Abstract: The article presents the results of the use of geoinformation systems (GIS) and Earth remote sensing (ERS) in the mapping and analysis of snow pollution in urban areas. The research was carried out on the basis of the generated database. The use of geoinformation systems tools allows to create electronic maps to assess the current ecological state of the territory, and the use of ERS data helps to simplify the assessment of pollution levels. Thematic maps have been constructed in the geoinformation environment: the level of lead pollution (mg/kg) (m²·day) by year, the density of atmospheric dust deposition on snow cover, and others. The assessment of the snow cover pollution of the ERS was carried out on the basis of images from the LANDSAT catalog of the Google Earth Engine (GEE) platform. The following indicators were calculated: *NDSI* — normalized difference index, *S3* — normalized index, *SCI* — pollution index. A significant correlation of the *NDSI* (or *S3*) index with the concentrations of Mn, Pb and Zn was revealed. The spatial distribution of the values of these indicators is displayed by the kriging method using the available open modules and scripts of the GEE platform. Maps of the spatial distribution of the main chemical elements of solid snow and meltwater sediment were obtained.

Key words: remote sensing data, databases, GIS technologies, snow cover, indicators, correlation.

For citation: Chupikova S.A., Chuldum A.F. Geoinformation and remote methods for assessing snow cover pollution (Kyzyl). *Geoinformatika*. 2023;(1):63–70. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-63-70>. In Russ.

Введение

Значительная антропогенная нагрузка на окружающую среду в городах, большая концентрация транспорта и производств вызывают необходимость учета экологического фактора при развитии

населенных пунктов. Загрязнение окружающей среды способствует развитию болезней у людей и ухудшению качества жизни. Для рационального использования земель в населенных пунктах крайне важно определить экологическое качество урбанизиро-

ванных территорий. Базой для его оценки и планирования мероприятий по развитию территорий являются мониторинг окружающей среды с применением данных дистанционного зондирования (ДДЗ) и эколого-географическое картографирование с использованием геоинформационных систем (ГИС). Применение ГИС-технологий и ДДЗ в таких исследованиях обеспечивает системный подход к анализу уровня загрязнения урбанизированных территорий, многовариантность картографирования, возможность создания новых видов электронных карт для принятия конкретных хозяйственных решений. Таким образом, данная проблематика, кроме чисто практической значимости, имеет также и весомую научную актуальность.

В данной статье рассматривается использование геоинформационных систем и ДДЗ для анализа загрязнения снежного покрова города в отопительный сезон. Очевидно, что в процессе таяния снега все загрязняющие вещества и микроэлементы проникают в почву и грунтовые воды, что не способствует их экологической чистоте.

Город Кызыл расположен с востока на запад в долине реки Енисей в месте слияния рек Большой Енисей и Малый Енисей. Долина представляет собой узкую межгорную котловину с высотами от 600 до 700 метров над уровнем моря. Устойчивый снежный покров держится порядка 90–110 суток, средняя температура января -28 – -29°C , в сильные морозы опускающаяся до -50°C и более. Более половины зимнего сезона является штилевым, а в остальные дни ветра чрезвычайно слабы, порядка 1 м/секунду. Перечисленные географические и климатические особенности приводят к образованию своеобразной «инверсионной крыши», препятствующей циркуляции воздушных масс, сносу и рассеиванию выбросов. Для города Кызыл, где работает ТЭЦ, 86 локальных котельных и более 14 000 частных домовладений отапливаются углем, а также насчитывается 61 000 единиц автотранспорта, из которых только 131 на газомоторном топливе, проблема загрязнения атмосферы стоит особенно напряженно.

Материалы и методы

Мониторинг загрязнения снежного покрова проводился с 2011 года с отбором проб снега на участках исследуемой территории города и пригорода. Пробы отбирали в соответствии с руководством по контролю загрязнения атмосферы [3, с. 534] в начале марта, в период максимального снеговозраста, со всей глубины залегания снежного покрова, затем растапливали в стеклянных емкостях при комнатной температуре. Фиксирование координат точек отбора проб производилось с помощью GPS. Точки пробоотбора были нанесены на электронную карту города с точной географической привязкой с использованием ГИС. Пылевую фракцию снега, сформированную из нерастворимых в воде неорганических компонентов угля и хлопьев

сажи (продукта неполного сгорания угля) [6], отделяли фильтрованием через беззольные фильтры «синяя лента» и высушивали при 100°C . Содержание микроэлементов определялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии, сажи (недожог угля) — по потере абсолютно-сухой массы нерастворимой фракции снега при прокаливании при 800°C [6, с. 508]. На основе полученных результатов была создана база данных [4], которая обеспечивает совместимость и конвертирование форматов для правильного отображения всего содержания таблиц и доступа к исходной информации, с возможностью интерпретации полученных результатов. В базе содержится максимально до 65 точек мониторинга по 11 химическим элементам, включая тяжелые металлы. Для обработки собранных данных разработан и создан геоинформационный проект (ГИС-проект). ГИС-проект включает базу геоданных и системные инструменты для пространственного анализа эколого-геохимических данных. Работа проводится в программе QGIS, предназначенной для создания, управления, интеграции и анализа географических данных.

На основе базы данных построена серия электронных тематических карт с единой топографической основой исследуемой среды. Построение осуществлялось в модуле интерполяции, использовались методы обратных взвешенных расстояний (IDW) и радиальных базисных поверхностей (RBF) [8]. Применялись следующие способы картографического изображения изучаемых явлений: изолинии, картограммы, картодиаграммы, локализованные диаграммы. Построенные карты дают наглядное представление о территориальных особенностях пространственного распределения тяжелых металлов в снежном и почвенном покровах, иерархии элементов и уровнях взаимодействия между ними, величине общего загрязнения территории города.

В настоящее время много работ ориентировано на изучение снежного покрова дистанционными методами, разработаны методы дистанционного анализа уровня запыления снегового покрова [1]. Критерием оценивания уровня загрязнения снега являются его отражательные характеристики в различных зонах спектра и вычисляемые на их основе снежные индексы [2, 5, 12]. По аналогии с вегетационным индексом *NDVI* предложен нормализованный разностный индекс снега *NDSI*, основанный на различной отражательной способности снега в видимой и инфракрасной частях спектра.

В качестве материала для оценки загрязнения снежного покрова загружались снимки Landsat 5 каталога LANDSAT/LT05/C01/T2_SR платформы Google Earth Engine. Данные Landsat 7 исследуемой территории (г. Кызыл и его пригород) во временной интервал (февраль–март 2011 года) имели разрывы, видимо, обусловленные небольшим дрейфом орбиты спутника. Наборы данных Landsat создаются на

федеральном уровне геологической службой USGS, находятся в общественном достоянии и могут использоваться, передаваться или воспроизводиться без ограничений авторского права. Расчет индексов *NDSI*, *S3*, *SCI* проводился в соответствии с формулами, приведенными в статье [7], где номера каналов переделаны для данных Landsat 5.

$$NDSI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR),$$

$$S3 = NIR * (Red - SWIR) / ((NIR + Red) * (NIR + SWIR)),$$

$$SCI = (Blue - Green) / (Blue + Green),$$

где *Green*, *SWIR*, *NIR*, *Red*, *Blue* — названия каналов Landsat5 — *B2*, *B5*, *B4*, *B3*, *B1*.

Диапазоны длины волн каналов Landsat 5, в мкм: *B1* (0,45–0,52), *B2* (0,52–0,60), *B3* (0,63–0,69), *B4* (0,77–0,90), *B5* (1,55–1,75).

Результаты и обсуждение

Систематизирование геохимических показателей твердого осадка снега и талой воды в единой базе геоданных, на единой топографической основе дает возможность проводить пространственный анализ данных и представлять результаты в наглядном виде. Нами в геоинформационной среде произведена экологическая оценка накоплений отдельных загрязнителей микроэлементов: Zn, Pb, Cu, Hg, As, и их суммарных воздействий (Z_c) в талом снеге и твердом остатке снежного покрова [8, 10, 11].

Естественно, условия накопления снежного покрова отличаются год от года: так, например, в отопительные сезоны 2011/12, 2012/13, 2013/14 гг. временной интервал между датой образования устойчивого снежного покрова и датой отбора проб составлял 113, 107 и 94 суток при средней мощности снега 15,4; 25,0 и 17,3 см, соответственно. В связи с этим динамика изменений загрязнений измерялась в нормированных единицах. Для анализа загряз-

нений снежного покрова была принята единица мг/(кг·м³·сутки), а для загрязнения территории города — мг/(м²·сутки). В процессе анализа загрязнений снежного покрова были созданы различные тематические карты. С помощью полученных карт выявлены локальные поля повышенной концентрации мышьяка, свинца, ртути и их динамика [8].

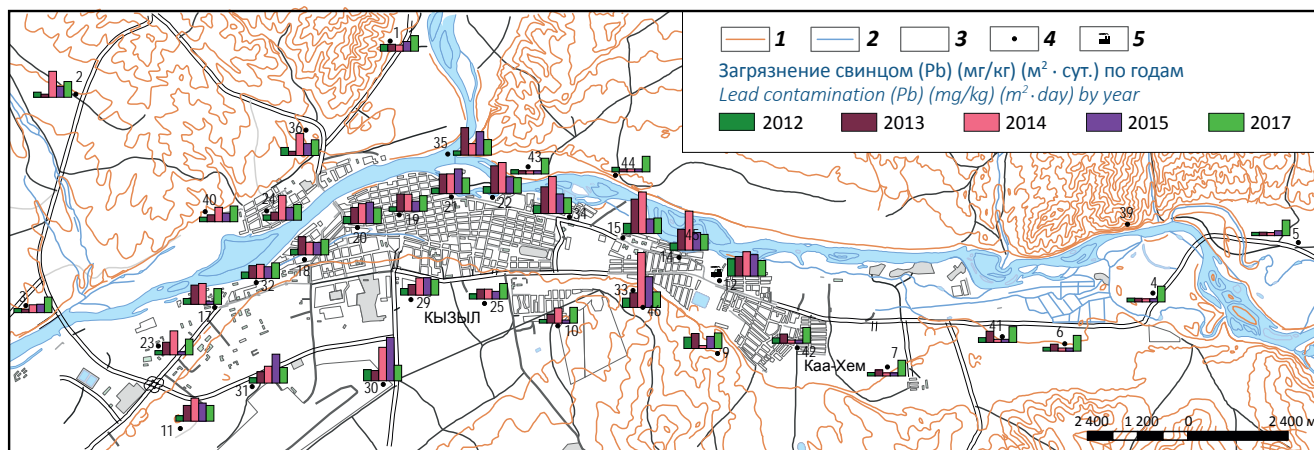
Динамика изменений среднесуточных концентраций Pb составляет 26,1 в северной части города против 40,5 в центральной. Показатель концентрации Pb в пыли, поглощенной толщиной снежного покрова в сутки, изменялся в пределах 0,003–0,451 (мг/кг)/(м³·сут). В 2014 г. среднесуточные выбросы Pb в северной зоне (max 0,401 мг/кг) увеличились значительно и стали соизмеримыми с таковыми в центральной зоне (max 0,451 мг/кг). Максимальные выбросы свинца (Pb) наблюдались в 2013–2015 годах (рис. 1, 2).

На рисунке 3 представлена карта-схема плотности выпадения взвешенных веществ (атмосферной пыли) на снежный покров территории г. Кызыл в 2013 г. Анализ данных пространственного распределения пылевого загрязнения снежного покрова позволяет сделать вывод о сохранении на протяжении всего периода наблюдений нескольких очагов загрязнения на территории города. Один из очагов пылевого загрязнения территории г. Кызыл расположен в восточной части города неподалеку от ТЭЦ. Возникновение других ореолов повышенного пылевого загрязнения в правобережной северной, южной и центральной зонах города связано с появлением в последние годы деревянных застроек с печным отоплением [6].

Оценки уровня запыления атмосферы с применение данных ДДЗ проведена нами по аналогии с принципами, изложенными в работе [7]. Авторы этой работы использовали данные Landsat 8, переда-

Рис. 1. Карта уровней загрязнения свинцом снежного покрова в г. Кызыле (мг/кг) (м²·сутки) по годам

Fig. 1. Map of lead contamination levels of snow cover in Kyzyl (mg/kg) (m²·day) by year

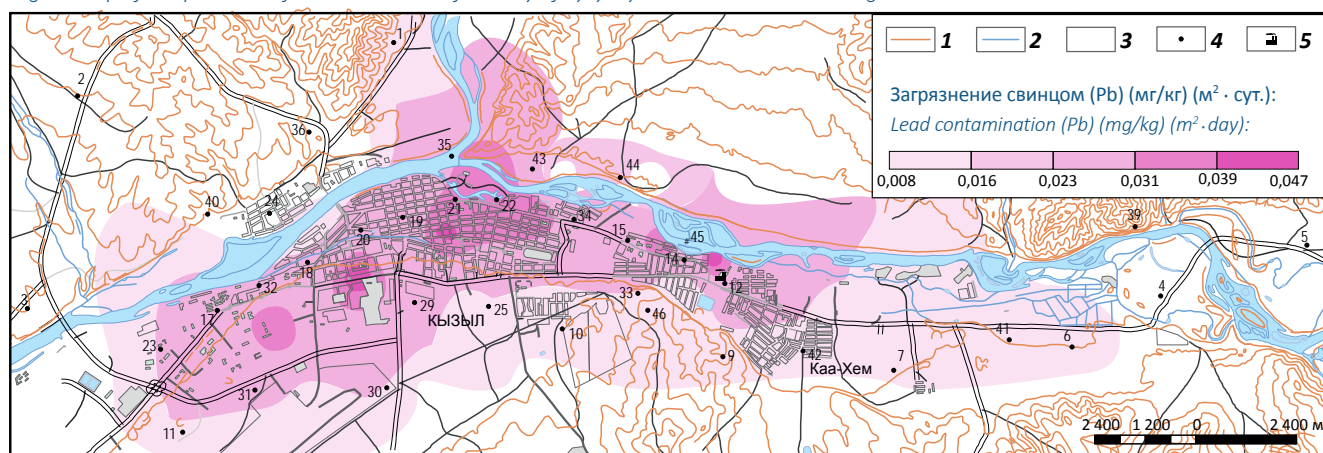


1 — рельеф, 2 — гидрография, 3 — кварталы, 4 — точки отбора проб и ее номер, 5 — ТЭЦ

1 — elevation, 2 — Rivers, 3 — neighborhoods, 4 — sampling points and its number, 5 — thermal power station

Рис. 2. Карта загрязнения снежного покрова г. Кызыла выбросами свинца по данным 2013 года

Fig. 2. Map of the pollution of the snow cover of the city of Kyzyl by lead emissions according to 2013 data

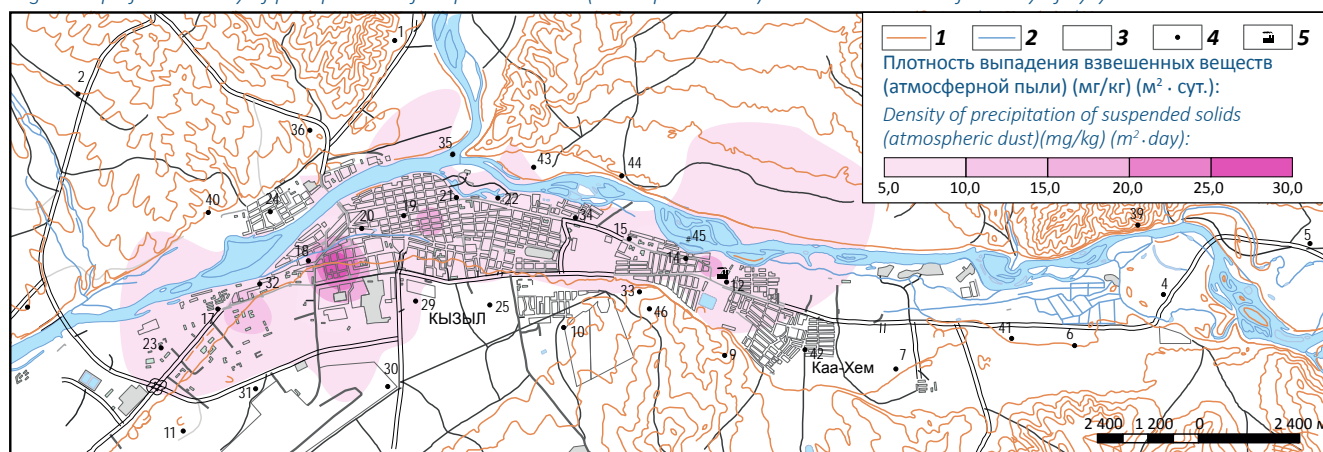


1 — рельеф, 2 — гидрография, 3 — кварталы, 4 — точки отбора проб и ее номер, 5 — ТЭЦ

1 — elevation, 2 — Rivers, 3 — heighborhoods, 4 — sampling points and its number, 5 — thermal power station

Рис. 3. Карта плотности выпадения взвешенных веществ (атмосферной пыли) на снежный покров г. Кызыла в 2013 году

Fig.3. Map of the density of precipitation of suspended solids (atmospheric dust) on the snow cover of the city of Kyzyl in 2013



1 — рельеф, 2 — гидрография, 3 — кварталы, 4 — точки отбора проб и ее номер, 5 — ТЭЦ

1 — elevation, 2 — Rivers, 3 — heighborhoods, 4 — sampling points and its number, 5 — thermal power station

ча снимков которых начинается с апреля 2014 года. В связи с тем, что в нашем случае отбор наземных проб снега проводился начиная с 2011 года, загружались снимки Landsat 5 каталога LANDSAT/LT05/C01/T2_SR платформы Google Earth Engine (GEE). Данные Landsat 7 исследуемой территории (г. Кызыл и его пригород) во временной интервал (февраль–март 2010 года) имели разрывы, видимо обусловленные небольшим дрейфом орбиты спутника. Расчеты за 2013 год производились по данным Landsat 7, полученным из каталога LANDSAT/LE07/C01/T1.

Для расчета индексов, средних показателей отражений от каналов и получения карт показателей была создана программа-скрипт на языке javascript в среде GEE.

Подобные скрипты в среде GEE были созданы нами ранее для вегетационных индексов [9].

В программе для расчета значений индексов и каналов, вокруг каждой из 22 точек строился полигон с радиусом 25 метров, и рассчитывались средние значения по всем точкам внутри построенного полигона.

На основе взятых из базы данных исходных точек с координатами и результатами химического анализа проведены необходимые вычисления. Определены средние значения отражений каналов Landsat 5 по полигонам вокруг исходных 22 точек и рассчитаны значения индексов *NDSI*, *S3*, *SCI*.

Корреляционная матрица исходных данных химического анализа, данных ДЗЗ и показателей *NDSI*, *S3*, *SCI* показана в таблице 1. Критическое значение

коэффициента корреляции для значимости при числе степеней свободы равной 20 и с вероятностью 0,05 по t-критерию Стьюдента должна быть выше 0,60 для положительной и ниже $-0,60$ для отрицательной корреляционной связи. Ячейки со значимыми коэффициентами выделены желтым.

В связи с тем, что для окрестностей исследуемых точек усредненные значения сигналов ДЗЗ по каналам B1–B4 показывают сильную корреляцию, показатели *NDSI* и *S3* как величины, зависящие от них, также показывают сильную корреляцию ($R=0,99$) (см. табл. 1). Поэтому для сравнения с наземными данными достаточно выбрать один из этих показателей, например, *NDSI*. Проведенными исследованиями установлено, что показатель *NDSI* (или *S3*) значимо коррелирует с концентрациями Mn, Pb и Zn со значениями коэффициентов корреляций 0,665, 0,676, 0,723 соответственно. С другой стороны, показатель *SCI* с концентрациями обнаруженных веществ корреляций не проявляет.

На рис. 4, 5 представлены построенные карты средних значений показателей *NDSI* и *S3* соответственно.

По этим картам *NDSI* и *S3* (рис. 4 и рис. 5) можно выделить области сильно загрязненных участков города, где значения данных показателей в среднем варьируют в пределах от $-0,22$ до $0,24$ для *NDSI* и от $-0,119$ до $0,044$ для *S3*, соответственно.

По мере удаления от города степень загрязненности плавно уменьшается, что также можно оценить по этим показателям.

Для сопоставления пространственного распределения значений этих показателей в районе обследования с геохимическими показателями твердого осадка снега производилась интерполяция концентраций элементов методом кригинга с помощью имеющихся открытых модулей и скриптов GEE.

Были опробованы следующие функции для семивариограммы: сферическая, гауссова и экспоненциальная.

Подбор основных параметров модельной функции семивариограммы производился визуально по получающимся картинкам распределения. В качестве примера на рисунке 6, приведена карта распределения концентрации свинца в образцах снега по данным 2013 года, полученная интерполяцией методом кригинга.

Выведены нормированные значения концентраций в процентах к общей сумме концентраций обнаруженных веществ (рис. 7).

Точки и центры высоких концентраций отчетливо выделяются, и по таким картинам можно выявить возможные источники загрязнений.

Заключение

Получение достоверных данных о состоянии природных объектов и их изменениях во времени — довольно сложная и трудоемкая задача. В связи с этим геоинформационные технологии и данные дистанционного зондирования занимают прочные позиции в системе средств, применяемых при проведении мониторинга окружающей среды. Результаты исследования показали эффективность использования геоинформационного подхода к ре-

Табл. 1. Матрица парных коэффициентов корреляций

Tab. 1. Matrix of paired correlation coefficients

| | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | NDSI | S3 | SCI | Cd | Co | Cu | Hg | Mn | Ni | Pb | Zn |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| B1 | 1 | 0,997 | 0,992 | 0,983 | 0,159 | -0,549 | 0,071 | 0,711 | 0,738 | -0,525 | -0,163 | 0,250 | -0,280 | -0,276 | -0,390 | -0,240 | -0,378 | -0,436 |
| B2 | 0,997 | 1 | 0,999 | 0,993 | 0,197 | -0,497 | 0,109 | 0,682 | 0,710 | -0,583 | -0,123 | 0,273 | -0,245 | -0,246 | -0,360 | -0,225 | -0,346 | -0,401 |
| B3 | 0,992 | 0,999 | 1 | 0,998 | 0,222 | -0,465 | 0,134 | 0,659 | 0,690 | -0,619 | -0,098 | 0,289 | -0,225 | -0,232 | -0,346 | -0,221 | -0,331 | -0,383 |
| B4 | 0,983 | 0,993 | 0,998 | 1 | 0,251 | -0,423 | 0,164 | 0,632 | 0,664 | -0,661 | -0,062 | 0,312 | -0,198 | -0,211 | -0,327 | -0,210 | -0,314 | -0,361 |
| B5 | 0,159 | 0,197 | 0,222 | 0,251 | 1 | 0,228 | 0,995 | -0,551 | -0,517 | -0,607 | 0,397 | 0,328 | 0,490 | 0,525 | 0,505 | -0,133 | 0,520 | 0,520 |
| B6 | -0,549 | -0,497 | -0,465 | -0,423 | 0,228 | 1 | 0,274 | -0,565 | -0,565 | -0,237 | 0,454 | 0,144 | 0,512 | 0,438 | 0,537 | 0,145 | 0,562 | 0,626 |
| B7 | 0,071 | 0,109 | 0,134 | 0,164 | 0,995 | 0,274 | 1 | -0,625 | -0,593 | -0,566 | 0,427 | 0,321 | 0,529 | 0,562 | 0,550 | -0,090 | 0,566 | 0,573 |
| NDSI | 0,711 | 0,682 | 0,659 | 0,632 | -0,551 | -0,565 | -0,625 | 1 | 0,999 | 0,004 | -0,396 | 0,009 | -0,566 | -0,594 | -0,665 | -0,154 | -0,675 | -0,723 |
| S3 | 0,738 | 0,710 | 0,690 | 0,664 | -0,517 | -0,565 | -0,593 | 0,999 | 1 | -0,036 | -0,381 | 0,030 | -0,560 | -0,589 | -0,665 | -0,162 | -0,675 | -0,723 |
| SCI | -0,525 | -0,583 | -0,619 | -0,661 | -0,607 | -0,237 | -0,566 | 0,004 | -0,036 | 1 | -0,429 | -0,461 | -0,286 | -0,251 | -0,164 | -0,067 | -0,173 | -0,179 |
| Cd | -0,163 | -0,123 | -0,098 | -0,062 | 0,397 | 0,454 | 0,427 | -0,396 | -0,381 | -0,429 | 1 | 0,766 | 0,866 | 0,814 | 0,754 | 0,620 | 0,672 | 0,709 |
| Co | 0,250 | 0,273 | 0,289 | 0,312 | 0,328 | 0,144 | 0,321 | 0,009 | 0,030 | -0,461 | 0,766 | 1 | 0,610 | 0,564 | 0,471 | 0,512 | 0,501 | 0,433 |
| Cu | -0,280 | -0,245 | -0,225 | -0,198 | 0,490 | 0,512 | 0,529 | -0,566 | -0,560 | -0,286 | 0,866 | 0,610 | 1 | 0,933 | 0,938 | 0,462 | 0,879 | 0,920 |
| Hg | -0,276 | -0,246 | -0,232 | -0,211 | 0,525 | 0,438 | 0,562 | -0,594 | -0,589 | -0,251 | 0,814 | 0,564 | 0,933 | 1 | 0,933 | 0,473 | 0,854 | 0,888 |
| Mn | -0,390 | -0,360 | -0,346 | -0,327 | 0,505 | 0,537 | 0,550 | -0,665 | -0,665 | -0,164 | 0,754 | 0,471 | 0,938 | 0,933 | 1 | 0,418 | 0,954 | 0,973 |
| Ni | -0,240 | -0,225 | -0,221 | -0,210 | -0,133 | 0,145 | -0,090 | -0,154 | -0,162 | -0,067 | 0,620 | 0,512 | 0,462 | 0,473 | 0,418 | 1 | 0,369 | 0,402 |
| Pb | -0,378 | -0,346 | -0,331 | -0,314 | 0,520 | 0,562 | 0,566 | -0,675 | -0,675 | -0,173 | 0,672 | 0,501 | 0,879 | 0,854 | 0,954 | 0,369 | 1 | 0,967 |
| Zn | -0,436 | -0,401 | -0,383 | -0,361 | 0,520 | 0,626 | 0,573 | -0,723 | -0,723 | -0,179 | 0,709 | 0,433 | 0,920 | 0,888 | 0,973 | 0,402 | 0,967 | 1 |

Рис. 4. Карта среднего показателя NDSI

Fig. 4. Map of the average NDSI indicator

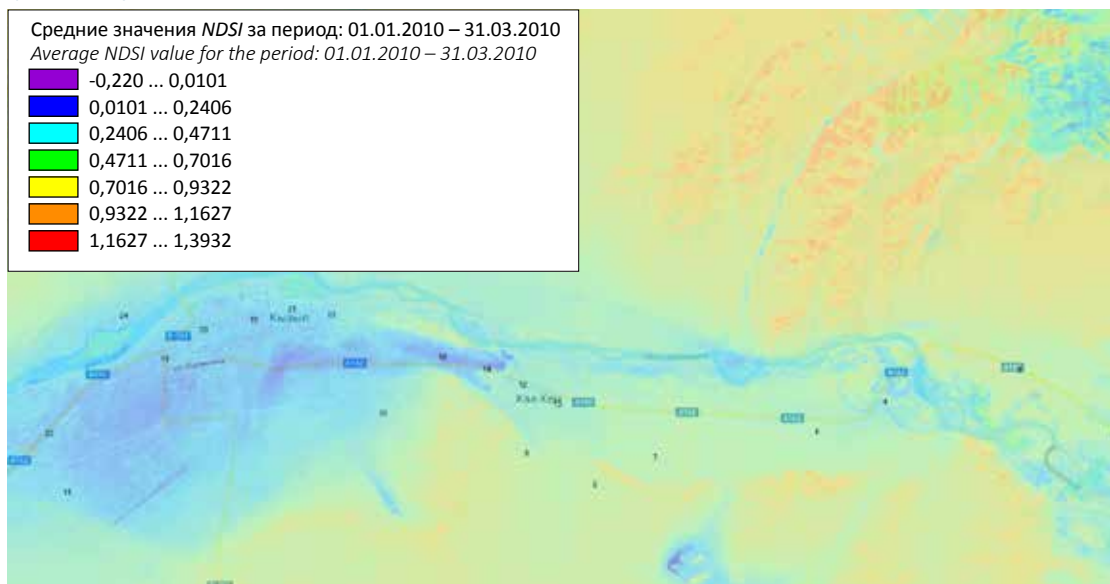


Рис. 5. Карта среднего показателя S3

Fig. 5. S3 average indicator map

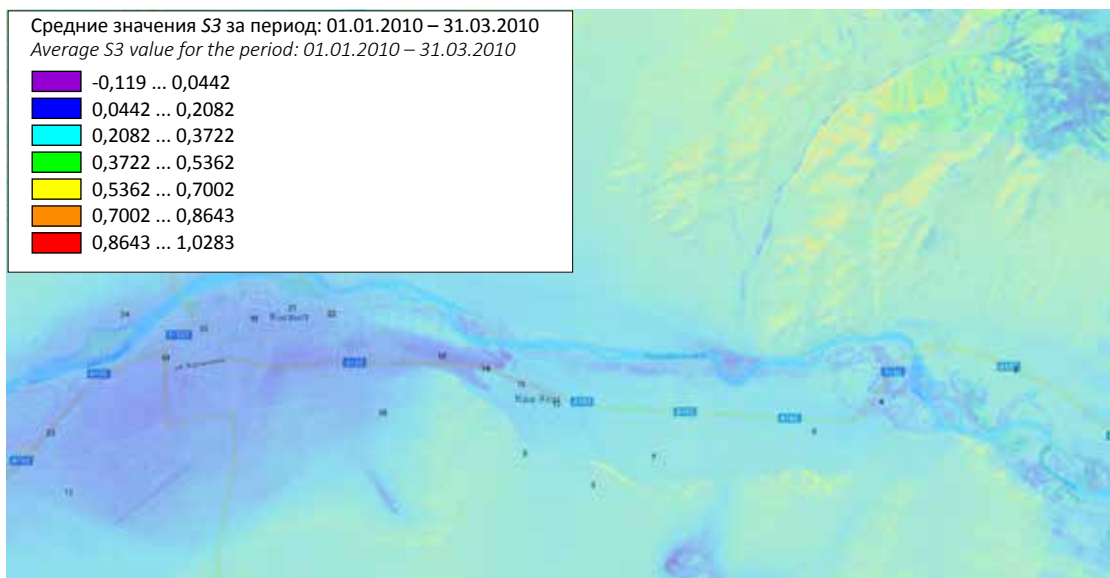


Рис. 6. Карта распределения концентрации Pb в образцах снега по данным 2013 года, полученная интерполяцией методом кригинга

Fig. 6. Map of Pb concentration distribution in snow samples according to 2013 data obtained by kriging interpolation

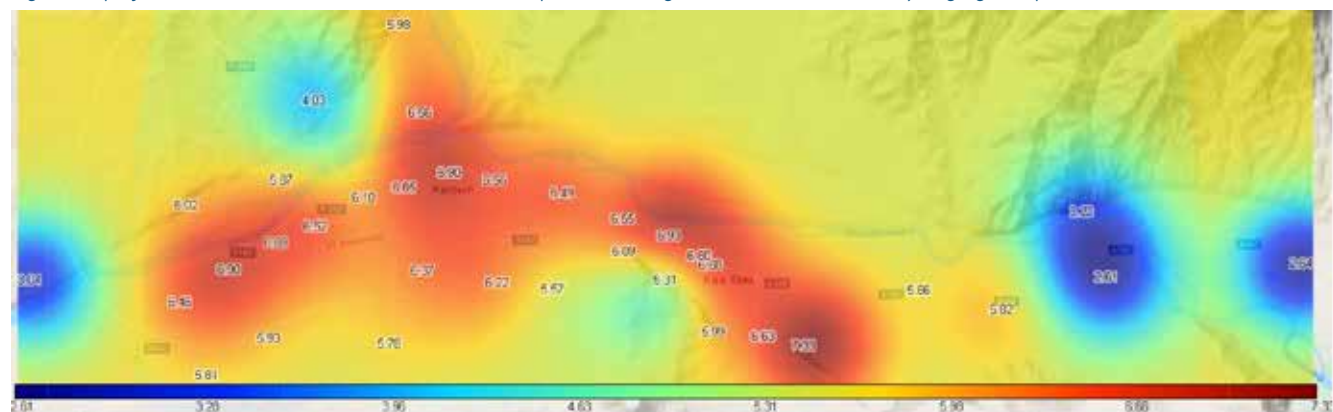
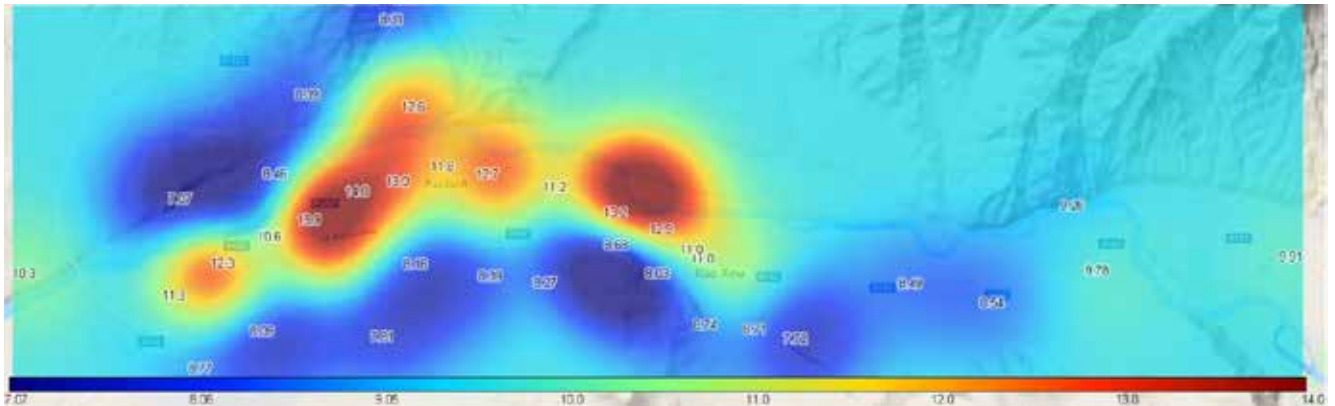


Рис. 7. Карта распределения концентрации Zn в образцах снега по данным 2013 года, полученная интерполяцией методом кригинга
 Fig. 7. Map of the distribution of Zn concentration in snow samples according to 2013 data, obtained by kriging interpolation



шению задач картирования загрязнения снегового покрова г. Кызыла. Апробированы основные методики идентификации вычисления снеговых индексов. Проведено сопоставление данных геохимических показателей твердого осадка снега и талой воды с результатами геоинформационного анализа данных ДДЗ с помощью программ ГИС и с помощью скриптов, созданных на платформе GEE. Получены карты пространственного распределения основных

химических элементов твердого осадка снега и талой воды по району обследования вокруг г. Кызыла интерполяцией методом кригинга.

Установлено, что показатель *NDSI* (или *S3*) значимо коррелирует с концентрациями Mn, Pb и Zn. С другой стороны, показатель *SCI* с концентрациями обнаруженных веществ корреляций не проявляет.

Статья выполнена в рамках б/н № 121031300230-2.

Список источников

1. 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. 159–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-159-168.
2. Лагутин А.А., Суторихин И.А., Сеницин В.В., Жуков А.П., Шмаков А.И. Мониторинг крупных промышленных центров юга Западной Сибири с использованием данных MODIS и наземных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 1. – С. 60–66.
3. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – Л. : Гидрометеоздат, 1991. – 693 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных 2020621771 Российская Федерация. Снежный покров г. Кызыл; заявл. 29.06.2020; опубл. 01.10.2020 / Н.Н. Янчат, С.А. Чупикова, М.П. Красильников, Л.Х. Тас-оол ; правообладатель ТувИКОПР СО РАН. 1 с.
5. Сухинин А.И., Воробьева М.В., Охоткина Е.А. Космический мониторинг снегового покрова Сибири по данным радиометра MODIS // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 4 (37). – С. 90–96.
6. Тас-оол Л.Х., Янчат Н.Н., Жданок А.И., Чупикова С.А. Загрязнение снежного покрова территории г. Кызыла // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2014. – № 6. – С. 507–517.
7. Тигеев А.А., Аксенов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю. Оценка пылевого загрязнения атмосферы наземными и дистанционными методами (на примере г. Тобольск) // Географический вестник. – 2021. – № 2 (57). – С. 121–134. DOI:10.17072/2079-7877-2021-2-121-134.
8. Хомушку Б.Г., Тас-оол Л.Х., Чупикова С.А., Янчат Н.Н. Геоинформационное картографирование загрязнения снежного покрова территории города Кызыл // Geteris Paribus. – 2016. – № 1-2. – С.67–70.
9. Чульдун А.Ф. Получение вегетационных индексов Тувы на платформе Google Earth Engine // Природные ресурсы, среда и общество. – 2021. – № 4 (12). – С. 51–58. DOI: 10.24412/2658-4441-2021-4-51-58.
10. Чупикова С.А. Применение ГИС для построения карт загрязнения снежного покрова // Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура: материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф (Кызыл, 18-20 октября 2017 г.). – Кызыл :ТувИКОПР СО РАН, 2017. – С. 267–271.
11. Чупикова С.А., Тас-оол Л.Х., Янчат Н.Н., Хомушку Б.Г. Использование ГИС при мониторинге загрязнения снежного покрова г. Кызыл // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: климат и экология Северных территорий и Байкальского региона: материалы 1-й междунар. науч.-практ. конф. (Иркутск, 26-29 июня 2017 г.). – Иркутск : ИРНТУ, 2017. – С. 110–113.
12. Ярославцева Т.В., Рапуста В.Ф. Использование космоснимков и наземных наблюдений для анализа полей длительного загрязнения снежного покрова города // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 50–54.

References

1. Krutskikh N.V., Kravchenko I.Yu. The use of Landsat satellite images for geoecological monitoring of urbanized areas. *Current problems in remote sensing of the Earth*. 2018;15(2):159–168. Doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-159-168.
2. Lagutin A.A., Sutorikhin I.A., Sinitsin V.V., Zhukov A.P., Shmakov I.A. The monitoring of the large industrial centers of the south of West Siberia, using the MODIS and field observation data. *Optika atmosfery i okeana*. 2011;24(1):60–66.
3. RD 52.04.186-89. Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery [RD 52.04.186-89. Guidelines for the control of atmospheric pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 693 p.
4. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh 2020621771 Rossiiskaya Federatsiya. Snezhnyi pokrov g. Kyzyl [Database registration certificate 2020621771. Snow cover of Kyzyl]; date of filing 29.06.2020; date of publication 01.10.2020. N.N. Yanchat, S.A. Chupikova, M.P. Krasil'nikov, L.Kh. Tas-ool; rightholder TuvKOPR SO RAN. 1 p.
5. Sukhinin A.I., Vorobiova M.V., Okhotkina E.A. Remote sensing of snow cover in Siberia on data of radiometer modis. *Vestnik of SibGAU*. 2011;37:90–96.
6. Tas-ool L. Kh., Yanchat N.N., Zhdanok A.I. Chupikova S.A. Pollution of snow cover in the territory of Kyzyl city. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2014;6:507–517.
7. Tigeev A.A., Aksenov N.V., Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu. Assessment of atmospheric dust contamination with ground-based and remote sensing methods (on the example of the town of Tobolsk). *Geographical bulletin*. 2021;57:121–134. Doi:10.17072/2079-7877-2021-2-121-134.
8. Khomushku B.G., Tas-ool L.Kh., Chupikova S.A., Yanchat N.N. Geoinformatsionnoe kartografirovanie zagryazneniya snezhnogo pokrova territorii goroda Kyzyl [Geoinformation mapping of snow cover pollution in the territory of Kyzyl]. *Geteris Paribus*. 2016;1–2:67–70.
9. Chuldum A.F. Obtaining vegetation indices for Tuva on the Google Earth Engine platform. *Natural resources, environment and society*. 2021;12:51-58. DOI: 10.24412/2658-4441-2021-4-51-58.
10. Chupikova S.A. Application of GIS for building maps of snow cover contaminations. In: Regional economy: technologies, economy, ecology, and infrastructure: proceedings of the 2nd international scientific and practical conference (Kyzyl, 18–20 October 2017). Kyzyl: TuvIENR SB RAS; 2017. pp. 267–271.
11. Chupikova S.A., Tas-ool L.Kh., Yanchat N.N., Khomushku B.G. Ispol'zovanie GIS pri monitoringe zagryazneniya snegovogo pokrova g. Kyzyl [The use of GIS in monitoring the pollution of the snow cover of Kyzyl]. In: Snow cover, atmospheric precipitation, aerosols: the climate and ecology of the Northern territories and the Baikal region: proceedings of the 1st international scientific and practical conference (Irkutsk, 26-29 June 2017). Irkutsk: INRTU; 2017. pp. 110–113.
12. Yaroslavtseva T.V., Raputa V.F. Using satellite imagery and ground surveillance for the analysis of long-term pollution fields of city snow cover. *Interexpo Geo-Siberia*. 2016;4(1):50–54.

Статья поступила в редакцию 10.10.2022, одобрена после рецензирования 26.10.2022, принята к публикации 20.01.2023.
The article was submitted 10.10.2022; approved after reviewing 26.10.2022; accepted for publication 20.01.2023.

Информация об авторах

Чупикова Светлана Алексеевна

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник
Тувинский институт комплексного освоения природных
ресурсов СО РАН
667007 Республика Тыва, Кызыл, ул. Интернациональная, 117а
e-mail: s_fom@inbox.ru
SPIN-код: 8367-9071
ORCID: 0000-0002-7904-5847
ResearcherID: R-6738-2016
Scopus ID: 57194128480

Чульдум Анатолий Федорович

Научный сотрудник
Тувинский институт комплексного освоения природных
ресурсов СО РАН
667007 Республика Тыва, Кызыл, ул. Интернациональная, 117а
e-mail: tajkinol@gmail.com
SPIN-код: 9253-9560
ORCID: 0000-0003-2771-3863
Researcher ID: A-3489-2014

Information about authors

Svetlana A. Chupikova

Candidate of geographic sciences, senior researcher
Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS
117a, Internatsionalnaya str., Kyzyl, 667007, Russia
e-mail: s_fom@inbox.ru
SPIN-code: 8367-9071
ORCID: 0000-0002-7904-5847
ResearcherID: R-6738-2016
Scopus ID: 57194128480

Anatoly F. Chuldum

Researcher
Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS
117a, Internatsionalnaya str., Kyzyl, 667007, Russia
e-mail: tajkinol@gmail.com
SPIN-code: 9253-9560
ORCID: 0000-0003-2771-3863
Researcher ID: A-3489-2014