

УДК 504.3.054:002.53(571.52)528.88

## Динамика показателей загрязненности снежного покрова в г. Кызыле в 2013–2021 гг. по данным дистанционного зондирования

А.Ф. Чульдум, С.А. Чупикова\*

*Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН  
667007, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117а*

Поступила в редакцию 16.09.2022 г.;  
после доработки 24.01.2023 г.;  
принята к печати 13.02.2023 г.

По данным дистанционного зондирования проведен анализ загрязненности г. Кызыла (Республика Тыва) в 2013–2021 гг. Оценка загрязненности осуществлена на базе снимков каталога LANDSAT платформы Google Earth Engine (GEE). Для оценки состояния снежного покрова рассчитаны показатели NDSI, S3, SCI. Построены карты среднего значения показателя NDSI по годам, определена степень загрязненности территории. Полученные результаты показывают, что площади с  $NDSI < 0,3$  за рассматриваемый период изменялись слабо, достигая минимума (0,3%) в 2015 и 2017 гг. и максимума (0,68%) в 2018 г. С 2014 по 2017 г. преобладали значения NDSI от 0,3 до 0,45 (более 64% всей исследуемой площади).

**Ключевые слова:** Арктика, дистанционное зондирование земли, индексы NDSI, S3, SCI, состояние снежного покрова; Arctic, remote sensing, NDSI, S3, SCI, snow cover state.

### Введение

Экологическое состояние воздушных бассейнов больших и малых городов мира — основополагающий фактор комфортного и безопасного проживания жителей. Постоянный мониторинг городского воздуха является актуальной задачей. По данным Федеральной службы государственной статистики [1], в России насчитывается 54,6 млн домохозяйств. Из них 70,6% (или 38,5 млн) в 2018 г. имели центральное отопление, а 7,3% (около 4 млн) — печное. Например, в Республике Алтай печками отапливаются до 38,8% домохозяйств, Бурятии — 42,7%, Забайкальском крае — 49,5%, а в Республике Тыва — до 87,8%. Недостатки в разработке и внедрении устройств и технологий для полного бездымного сжигания ископаемого топлива приводят к тому, что продукт неполного сгорания угля — сажа — продолжает загрязнять атмосферу. Помимо этого, большое количество транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, химические заводы, фабрики и т.д. отрицательно влияют на окружающую среду городских поселений. Установлена связь между загрязнением воздуха и ухудшением здоровья населения с тенденцией к росту числа заболеваний (см., например, [2]).

Оптимальной депонирующей средой для получения информации о поступлении загрязняющих

веществ из атмосферы за сравнительно длительный период является снежный покров. В последнее время наряду с наземными методами анализа состояния снежного покрова используются данные дистанционного зондирования (ДДЗ). С их помощью можно изучать состояние земной поверхности, почвы, растительности, воды, льда и снега [3–10].

Один из широко используемых методов оценки загрязнения снежного покрова — вычисление числовых показателей, определяемых как комбинации значений спектральных коэффициентов отражения солнечного света поверхностью снега и теплового излучения Земли [11, 12].

Для оценки состояния наземных природных объектов используются более сотни различных индексов. Они подбираются экспериментально (эмпирическим путем) исходя из известных особенностей спектральной отражательной способности поверхности. Для определения наличия на поверхности земли снега и характеристики его чистоты чаще всего используют следующие индексы: NDSI, S3, SCI. Причины выбора этих показателей для оценки состояния снежного покрова были описаны в работах [13, 14].

Цель настоящей работы — оценить степень загрязненности снежного покрова в г. Кызыле с 2013 по 2021 г. по ДДЗ. Для этого проведем расчет показателей NDSI, S3, SCI и с их помощью проследим динамику загрязнения снежного покрова.

Город Кызыл (Республика Тыва) расположен в долине, у слияния р. Большой и Малый Енисей, вытянут с востока на запад, высота над уровнем

\* Анатолий Федорович Чульдум (tajkinol@gmail.com);  
Светлана Алексеевна Чупикова (s\_fom@inbox.ru).

моря от 600 до 700 м. Устойчивый снежный покров на территории города держится 90–110 сут. Ландшафтные и климатические особенности обуславливают появление температурной инверсии в зимние месяцы, приводящей к накоплению техногенных выбросов в приземном слое атмосферы без переноса на дальние расстояния и последующему выпадению несгоревшей части угля на снеговой покров [15, 16]. По данным Министерства топлива и энергетики Республики Тыва [17], в Кызыле функционируют теплоэлектростанция, до 80 малых отопительных котельных и около 22 тыс. частных домовладений, сжигающих уголь.

## Материалы и методы исследования

Исходные данные взяты из каталога LANDSAT/LC08/C01/T1\_TOA платформы GEE (Google Earth Engine — облачная платформа для геопространственного анализа данных). Они являются преобразованными ДДЗ программы NASA Landsat-8, созданной Геологической службой USGS, и могут использоваться, передаваться или воспроизводиться без ограничений авторского права.

В программной среде данной платформы были созданы скрипты, которые выполняли следующие операции:

- загружали коллекции ДДЗ из каталога платформы, координаты точек исследуемых областей из рабочего каталога;
- фильтровали данные по времени в соответствии с диапазоном дат, заданным в скрипте; по проценту облачности; выполняли пространственную фильтрацию по границам полигонов, заданным пользователем;
- рассчитывали индексы NDSI, S3, SCI для точек внутри полигонов на основе загруженных данных, средних значений индексов для заданных диапазонов времени;
- составляли карты пространственного распределения рассчитанных индексов;
- формировали таблицы расчетных значений индексов.

Для проведения расчетов с помощью этих скриптов нами были выделены следующие полигоны:

- полигон Р в виде прямоугольника вокруг г. Кызыла с координатами двух противоположных угловых точек (51,6632° с.ш., 94,2854° в.д.) и (51,7621° с.ш., 94,6455° в.д.);
- полигоны Т (35 шт.) в виде сформированных с помощью скрипта кругов радиусом 15 м с центрами в точках, в которых ранее выполнен отбор проб снега [15, 16, 18], были предварительно импортированы нами в рабочее пространство GEE.

Расчет индексов проведен по формулам, используемым в работе [18]:

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

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

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

где Green, SWIR, NIR, Red, Blue — названия каналов Landsat-8.

Значения индексов усреднялись по всем точкам внутри полигонов Т.

Для получения карты распределения значений индексов за определенный год изображения были отфильтрованы по диапазону дат с 1 декабря по 1 марта. Индекс облачности устанавливался менее 20%. Для выбранных изображений выполнено пространственное усреднение индексов для каждого пикселя в пределах кругового полигона радиусом 15 м. Результаты сохраняются в табличной форме в формате CSV с полями: номер точки, координаты точки, интенсивность каналов B1–B7 Landsat-8, рассчитанные значения NDSI, S3, SC. Сравнение значений NDSI, S3, SC для всех точек полигона Р показало значительную корреляцию (коэффициенты попарных корреляций достигают 0,98), поэтому при представлении результатов исследования мы использовали индекс NDSI.

## Результаты и обсуждение

Как известно, индексы NDSI, S3 и др. определяются как математические комбинации значений коэффициентов отражения в точках поверхности Земли, измеренных космическими спутниками в разных частях спектра и соответствующим способом обработанных. Они зависят от многих факторов, таких как облачность, состояние атмосферы, время съемки и пр.

В процессе работы сформирована табл. 1 статистических параметров индексов для каждого рассматриваемого года по всему полигону Р; вычисления проведены по 31 точке, где ранее отбирались пробы снега. Видно, что стандартные отклонения рассчитанных значений относительно средних сравнительно небольшие.

На исследуемой территории снег обычно выпадает к концу октября, а устойчивый снежный покров в рассматриваемые годы устанавливался в декабре. Проведенное нами в ходе предварительной обработки сравнение карт распределения NDSI за бесснежные октябрь и апрель с декабрьскими дает основание полагать, что в пределах полигона Р среднее значение NDSI < 0,21 для асфальтированных дорог и от 0,32 до 0,38 для областей с растительностью.

Карта пространственного распределения среднего значения NDSI внутри полигона Р за период с 1.12.2013 г. по 28.02.2014 г. (рис. 1, цв. вкладка) иллюстрирует, что минимальное среднее значение NDSI = 0,022, максимальное — 0,7097. Цифрами на карте обозначены точки отбора проб снега согласно [15, 16, 18].

Для полигона Р минимальные и максимальные значения NDSI с 2013 по 2021 г. составили 0,020 и 0,794 соответственно.

Для полигонов Т, где проводился химический анализ снега, минимальные и максимальные зна-

Таблица 1

**Временные изменения максимального, среднего, минимального и стандартного отклонения индексов NDSI, S3, SCI по всему полигону Р**

| Параметр     | 2013/2014 | 2014/2015 | 2015/2016 | 2016/2017 | 2017/2018 | 2018/2019 | 2019/2020 | 2020/2021 |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| NDSI         |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Макс.        | 0,660     | 0,678     | 0,461     | 0,430     | 0,556     | 0,691     | 0,484     | 0,648     |
| Ср.          | 0,442     | 0,445     | 0,292     | 0,330     | 0,262     | 0,407     | 0,345     | 0,439     |
| Мин.         | 0,200     | 0,248     | 0,114     | 0,235     | 0,090     | 0,185     | 0,249     | 0,029     |
| Станд. откл. | 0,113     | 0,086     | 0,079     | 0,051     | 0,094     | 0,116     | 0,058     | 0,143     |
| S3           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Макс.        | 0,330     | 0,297     | 0,317     | 0,282     | 0,282     | 0,304     | 0,318     | 0,350     |
| Ср.          | 0,234     | 0,227     | 0,234     | 0,223     | 0,223     | 0,213     | 0,252     | 0,234     |
| Мин.         | 0,144     | 0,142     | 0,165     | 0,142     | 0,160     | 0,134     | 0,171     | 0,160     |
| Станд. откл. | 0,048     | 0,032     | 0,032     | 0,033     | 0,029     | 0,038     | 0,037     | 0,041     |
| SCI          |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Макс.        | 0,135     | 0,150     | 0,139     | 0,124     | 0,119     | 0,128     | 0,130     | 0,149     |
| Ср.          | 0,078     | 0,099     | 0,084     | 0,078     | 0,090     | 0,085     | 0,083     | 0,082     |
| Мин.         | -0,020    | 0,009     | 0,006     | 0,017     | 0,030     | 0,011     | -0,008    | -0,030    |
| Станд. откл. | 0,022     | 0,025     | 0,020     | 0,017     | 0,015     | 0,018     | 0,021     | 0,024     |

чения NDSI с 2013 по 2021 г. составили 0,2691 и 0,7091 соответственно.

Средние значения за период 1.12.2013–28.02.2014 гг. по всем пикселям внутри полигона Т, рассчитанные показатели NDSI и содержания сажи в образцах снега в тех же точках отбора [18] (дата отбора проб – 3 марта 2013 г.) показали отрицательную корреляцию Пирсона (коэффициент парной корреляции  $R = -0,67906$  при уровне значимости 0,05; расчетное значение  $t$ -критерия Стьюдента равно 4,982 при критическом 2,364). Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,461$ .

Нами принята следующая градация значений NDSI для характеристики загрязнения снежного покрова исследуемой территории (табл. 2).

Таблица 2

**Градация загрязнения снежного покрова по NDSI**

| Степень загрязнения снега | Среднее значение NDSI |
|---------------------------|-----------------------|
| Чистый                    | $> 0,6$               |
| Умеренно грязный          | 0,451–0,6             |
| Грязный                   | 0,3–0,45              |
| Сильно грязный            | $< 0,3$               |

В соответствии с принятой градацией построены карты распределения среднего значения NDSI по годам; определены области с разным уровнем загрязнения снежного покрова. Пример карты за 2018/2019 г. представлен на рис. 2 (цв. вкладка) с указанием процентов территории с разной степенью загрязнения. Можно отметить однородность уровня загрязнения снежного покрова: в пределах города снежный покров «грязный», за пределами – «умеренно грязный». Территории с максимальным загрязнением имеют линейную вытянутую форму, они расположены вдоль дорог, отдельные ареалы находятся вокруг ТЭЦ и котельных.

Для характеристики вариабельности показателя NDSI были выбраны точки № 5, 15 и 17 (см. рис. 1). Точка № 5 расположена за пределами города, и в ней значение NDSI часто максимальное, содер-

жание сажи в образце – 40,24 мг/кг [18]. В точке № 17 значения NDSI самые низкие, а содержание сажи в образце (807,04 мг/кг) – самое высокое [18]. Выбор точки № 15 обусловлен тем, что значение NDSI для этой точки близко к среднему по всем точкам в центральной части города; содержание сажи в образце – 457,34 мг/кг [18]. График изменений NDSI для выбранных точек по годам показан на рис. 3.

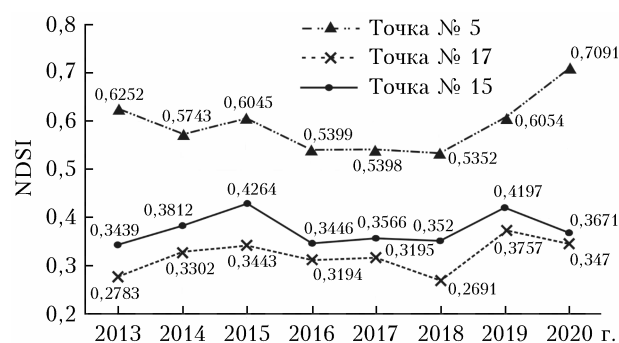


Рис. 3. График изменения NDSI по годам в окрестностях точек № 5, 15, 17

По мнению авторов [13, 19],  $NDSI < 0,53$  говорит о том, что снег «грязный». Согласно рис. 3 и картам (см. рис. 1, 2) середина интервала значений NDSI, соответствующих категории «умеренно-грязный» снег по принятой нами градации, близка к этому значению. Содержание сажи в образцах –  $\geq 80$  мг/мл по данным [16]. Исходя из этого, есть основания полагать, что NDSI неплохо отражает степень загрязненности снежного покрова.

Изменения площадей загрязнения снежного покрова в соответствии с градацией из табл. 2 с 2013 по 2021 г. представлены на рис. 4. Видно, что с 2013 г. уровень загрязнения снежного покрова рос, что нашло отражение в увеличении площадей загрязнения. Полученные результаты хорошо сопоставимы с ранее проведенными исследованиями [15, 16].

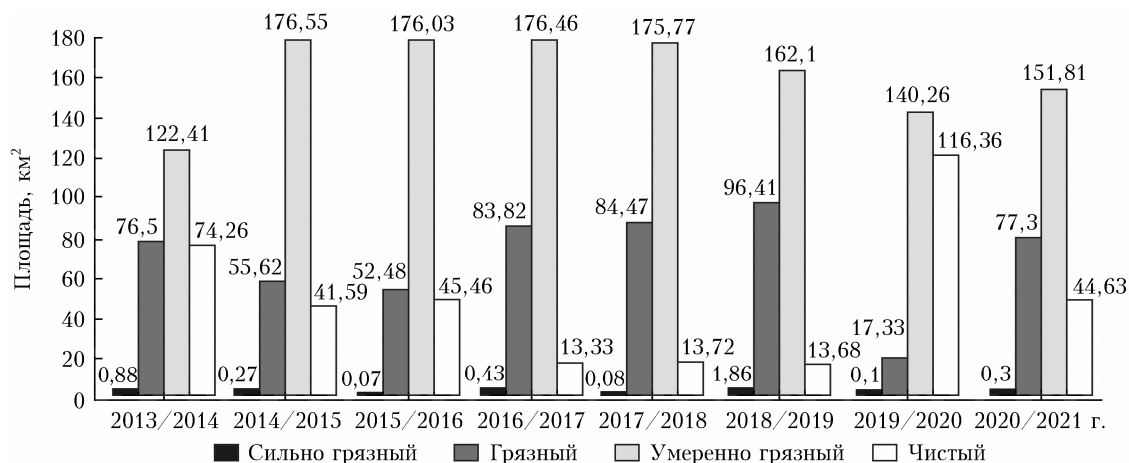


Рис. 4. Изменение площадей участков со снежным покровом разной степени загрязнения в соответствии со средними значениями NDSI с 2013 по 2021 г.

В работе [15] установлено, что содержание сажи в пылевых выбросах промышленного сектора достигает 73%, в частном секторе – 63%, в выбросах ТЭС не превышает 12% от общей массы уловленной зо-лы-уноса. Поскольку содержание сажи в пылевых частицах снега промзоны и частного сектора превышает 60%, авторы [15. С. 536] считают, что более 2/3 пылевых выбросов производственно-отопительных котельных и домашних печей состоит из сажи, что обусловлено недожигом угля, и отмечают, что с 2012–2014 гг. наблюдалось увеличение выбросов зольных элементов углей, аккумулирующихся и в пылевой, и в талой фракциях снежного покрова г. Кызыла и его окрестностей.

Полученные нами результаты показывают, что площади с «сильно грязным» снегом в исследуемый период изменялись незначительно: минимальное значение (0,03% от всей исследуемой территории) отмечалось в 2015 и 2017 гг., максимальное (0,68%) – в 2018 г. С 2014 по 2017 г. преобладала категория «умеренно грязный» снег (> 64%).

Проведенные исследования показывают, что по динамике NDSI снежный покров в г. Кызыле (вплоть до 4 км за границами жилого массива, а именно внутри полигона Р) за 2013–2021 гг. может быть классифицирован как «грязный» и «умеренно грязный». В черте города зимой средние значения NDSI соответствуют категории «грязный» снег.

## Заключение

В программной среде GEE созданы скрипты и с их помощью получены карты и числовые таблицы динамики показателей NDSI, S3 и SCI, которые широко используются для оценки степени загрязнения снежного покрова. Созданные скрипты позволяют выбирать районы по диапазону значений этих трех индексов для численных оценок степени чистоты или загрязнения снежного покрова. Впервые по данным дистанционного зондирования оценена динамика загрязнения снежного покрова в г. Кызыле с ноября 2013 г. по март 2021 г. по NDSI.

Анализ значений NDSI, S3, SCI подтверждает высокий уровень загрязнения снега в рассматриваемый период в г. Кызыле.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках госзадания Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов.

## Список литературы

1. Регионы России. Социально-экономические показатели. Стат. сб. М.: Росстат, 2019. 1204 с.
2. Макоско А.А., Матешева А.В. О тенденциях распространности экологически обусловленных заболеваний вследствие техногенного загрязнения атмосферы // Инновации. 2012. № 10. С. 98–105.
3. 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.
4. Леженин А.А., Ярославцева Т.В., Ратуша В.Ф. Мониторинг аэрозольного загрязнения снежного покрова на основе наземной и спутниковой информации // Журн. СФУ. Сер.: Техника и технологии. 2016. Т. 9, № 7. С. 950–959.
5. Ратуша В.Ф., Леженин А.А., Ярославцева Т.В. Оценка параметров выбросов Новосибирских ТЭЦ с использованием спутниковой информации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 1, № 4. С. 137–146.
6. Тимофеева С.С., Шешукова Л.В., Охотин А.Л. Мониторинг свалок твердых бытовых и промышленных отходов в Иркутском районе по данным космических снимков // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2012. Т. 68, № 9. С. 76–81.
7. Батракова Г.М., Ивенских О.В., Пономарчук А.И. Применение дистанционного зондирования Земли для экологической оценки территорий складирования отходов // Вестн. Перм. национ. исслед. политехн. ун-та. Урбанистика. 2012. Т. 8, № 4. С. 73–83.
8. Митрофанов Е.В., Бубненко Д.И., Шашнев И.В. О применении узкоспектральных вегетационных индексов для оценки состояния лесной растительности // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Сер: Естественные науки. 2012. № 4. С. 118–122.

9. Братков В.В., Заурбеков Ш.Ш., Ключин П.В., Марьин А.Н. Дистанционное зондирование территории Северного Кавказа // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2011. Т. 76, № 4. С. 069–080.
10. Гордиенко А.С. Исследование возможности выявления негативного воздействия разливов нефти на окружающую растительность по данным дистанционного зондирования Земли // Вестн. СГУГиТ (Сиб. гос. ун-та гео-систем и технологий). 2021. Т. 26, № 6. С. 48–55.
11. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Стальная М.В., Фаминская М.В. Данные космических наблюдений параметров поверхности и их реанализа в модели рассеяния индустриальных загрязнений воздуха AERMOD. Часть 2. Альbedo, шероховатость поверхности и параметр Боуэна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 3. С. 121–137.
12. Пожитков Р.Ю., Тигеев А.А., Московченко Д.В. Оценка пылевых выпадений в снежном покрове с использованием данных дистанционного зондирования Земли (на примере г. Нижневартовск) // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 10. С. 767–773; Pozhitkov R.Yu., Tigeev A.A., Moskovchenko D.V. Estimation of Dust depositions in snow cover using Earth's remote sensing data: Example of Nizhnevartovsk // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 1. P. 19–25.
13. Тигеев А.А., Аксенов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю. Оценка пылевого загрязнения атмосферы наземными и дистанционными методами (на примере г. Тобольск) // Географ. вестн. 2021. Т. 57, № 2. С. 121–134. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-2-121-134.
14. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Rem. Sens. Environ. 2009. V. 113, N 5. P. 893–903.
15. Тасоол Л.Х., Хомушук Б.Г., Чутикова С.А., Янчат Н.Н. Геохимические аспекты загрязнения окружающей среды г. Кызыл пылевыми частицами дымовых выбросов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2016. № 6. С. 531–542.
16. Тасоол Л.Х., Калущ Ю.А., Чутикова С.А. 3D-моделирование загрязнения атмосферы на примере г. Кызыл // Геоинформатика. 2016. № 3. С. 12–16.
17. Министерством топлива и энергетики РТ прорабатываются различные варианты для снижения загрязнения сажей воздушного бассейна Кызыла // Тувинская правда: общественно-политическая газета Республики Тува. URL: <https://tuvapravda.ru/novosti/ministerstvom-topliva-i-energetiki-rt-prorabatyvayutsya-razlichnye-varianty-dlya-snizheniya-zagryazneniya-sazhej-vozdushnogo-bassejna-kyzyla> (дата обращения: 17.11.2022).
18. Снежный покров г. Кызыл: Свид-во о регистрации БД 2020621771. Янчат Н.Н. и др.; ТУВИКОПР СО РАН; Заявл. 29.06.2020; Опубл. 01.10.2020; Бюл. № 10.
19. Сухинин А.И., Воробьева М.В., Охоткина Е.А. Космический мониторинг снежного покрова Сибири по данным радиометра MODIS // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетникова. 2011. Т. 37, № 1. С. 90–96.

**A.F. Chuldum, S.A. Chupikova. Dynamics of indicators of snow cover contamination in the city of Kyzyl for 2013–2021 according to remote sensing data.**

The snow cover pollution in Kyzyl in 2013–2021 is analyzed based on remote sensing data. Software scripts are created in the GEE software environment; NDSI, S3, and SCI indices are calculated. Maps of the annual average value of NDSI are constructed; the degree of contamination of the territory is determined. It is found that the areas with NDSI < 0.3 weakly changed in 2013–2021: it was minimal in 2015 and 2017 and maximal (0.68%) in 2018. The NDSI values from 0.3 to 0.45 (more than 64% of the total territory under study) prevailed from 2014 to 2017.

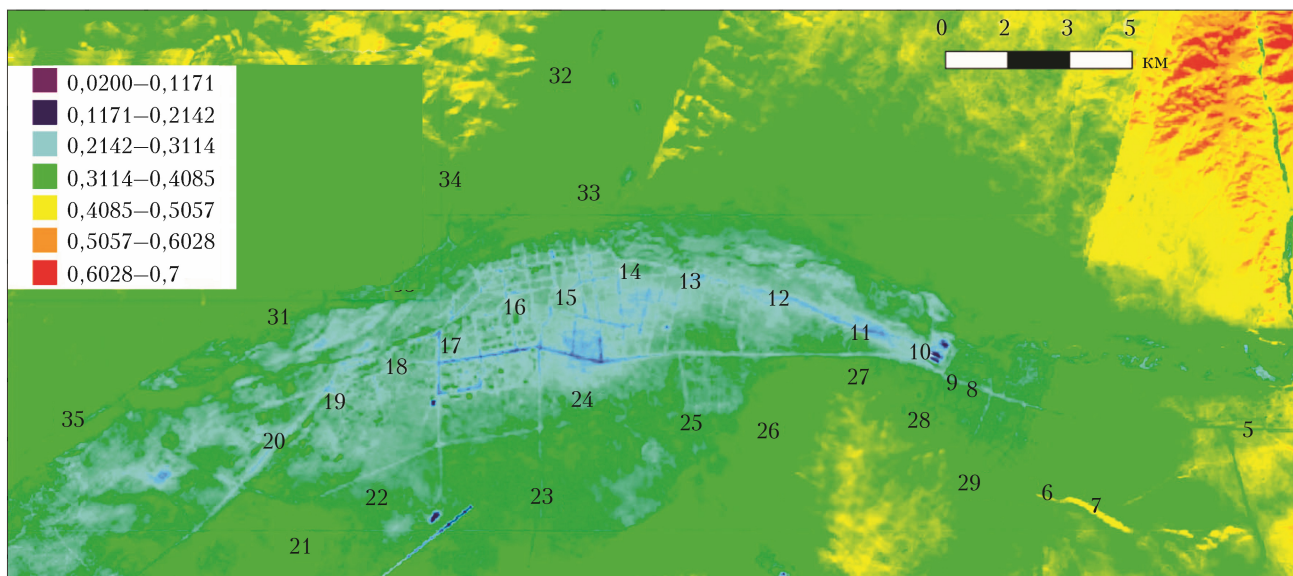


Рис. 1. Карта распределения среднего значения NDSI в г. Кызыле за период с 1.12.2013 г. по 28.02.2014 г. Указаны номера точек проботбора снега

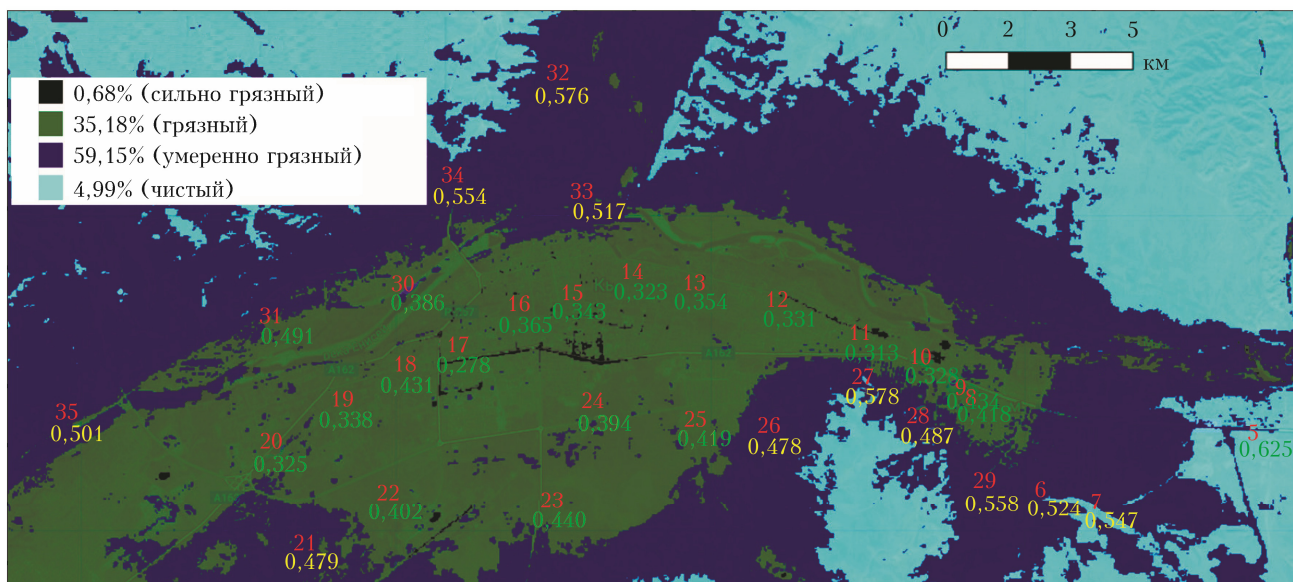


Рис. 2. Карта распределения среднего значения NDSI и степени загрязнения снежного покрова в г. Кызыле за период с 1.12.2018 г. по 28.02.2019 г.