

Оценка изменений растительности Норильского промышленного района по дистанционным данным на основе анализа трендов спектральных индексов

О. М. Железный, О. В. Тутубалина, В. И. Кравцова

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Москва, 119991, Россия

E-mail: olgatut@mail.ru

Растительность Норильского промышленного района, деградировавшая на значительных площадях под воздействием аэротехногенного загрязнения, варьировавшего на разных этапах деятельности металлургического комбината, испытывает влияние потепления климата. Для оценки изменений растительности использовались материалы съёмки со спутников Landsat-5, -7, -8 за всё время их работы с 1984 г., полученные и обработанные с использованием облачной платформы Google Earth Engine. На период активной вегетации (1 июля – 10 августа) отобрано 1522 снимка, проведена их очистка от влияния облачности и снега, выполнена кросс-корреляция съёмочных систем разных спутников. Оценка состояния растительности основывалась на значениях вегетационного индекса NDVI, максимальных в каждом пикселе за летний сезон. По этому ряду данных проведены статистические тесты — простая линейная регрессия и анализ трендов Манна–Кендалла; таким образом, анализ изменений базируется на трендах NDVI. Для лучшего учёта изменений древесно-кустарникового покрова использовался аналогичный анализ спектрального влажностного индекса NDMI. Анализ пространственной структуры тренда показал, что максимальный стабильный прирост обоих индексов наблюдается к юго-востоку от Норильска, в долине р. Рыбной, в прошлом наиболее сильно пострадавшей от загрязнения. Проверка по современным снимкам сверхвысокого разрешения подтверждает появление травянистой и кустарниковой растительности на участках сильного положительного тренда. Аналогичное исследование по данным MODIS/Terra-Aqua за 2000–2020 гг. также показало наибольший тренд NDVI по долине р. Рыбной. Анализ изменений растительности по снимкам сверхвысокого разрешения показал, что наибольший рост NDVI приурочен к малым эрозионным формам.

Ключевые слова: космические снимки, вегетационный индекс, NDVI, восстановление растительности, Норильск, Арктика

Одобрена к печати: 20.01.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-170-178

Введение

Норильский горно-металлургический комбинат, основанный в 1935 г. на месте богатого месторождения цветных металлов, — один из крупнейших в мире производителей никеля, платины и палладия, и в то же время Норильск — один из наиболее загрязнённых городов Арктики. В 1920–1930-х гг. территория в окрестностях комбината была занята лиственными лесами, но уже к 1970-м гг. леса под воздействием выбросов в атмосферу сернистого ангидрида SO_2 начали усыхать, а дальнейшее развитие производства в 1980-е гг. привело к масштабной деградации растительного покрова на окружающей территории. Развал СССР, переход из государственной в частную собственность вызвали на рубеже веков перерыв в активности комбината, снижение объёмов производства и, соответственно, выбросов. Улучшению состояния экосистем способствовало изменение климата, особенно заметное в арктических широтах, где отмечается максимальная интенсивность роста среднегодовой температуры (Serreze et al., 2009). Создались условия для частичного восстановления растительности на территориях, наиболее сильно пострадавших от загрязнения воздуха в XX в. Характеристика реакции растительности на изменения техногенных и природных факторов важна для определения правильной экологической политики в регионе, выявления допусти-

мых нагрузок по загрязнению, грамотного планирования и проведения восстановительных мероприятий. В связи с этим становится особенно актуальной задача дистанционного мониторинга состояния растительности, выявления пространственной структуры её изменений для обеспечения дифференцированного подхода при природоохранных и восстановительных мероприятиях. Разработка методики определения изменений растительности за длительный период в конце XX — начале XXI в. по материалам космической съёмки и представляет задачу настоящей статьи.

Район и объекты исследования

В качестве района исследований выбрана обширная территория, прилегающая к Норильску, ограниченная прямоугольным полигоном, со следующими координатами в проекции UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator, проекция Меркатора) WGS84 (*англ.* World Geodetic System, всемирная система геодезических параметров Земли) (зона 45N (45 северная)): юго-западный угол — 428707, 7524982; северо-восточный угол — 663067, 7802522. Охвачен район от западного края плато Путорана до долины Енисея, включая наиболее пострадавшую от загрязнения территорию к юго-востоку от Норильска — долину р. Рыбной и менее подверженные загрязнению невысокий хребет Локтокойский Камень и приенисейские равнины. В районе представлены два основных типа ландшафтов: сибирские лесотундровые на четвертичных моренных и зандровых равнинах и горнотундровые (Исаченко, 1964). Первые варьируют от елово-лиственничных, берёзово-лиственничных и лиственничных лесов и редколесий в предгорьях до заболоченных и заозёрных лесотундр с редкими лиственницами на низменных равнинах. Горные тундры представлены каменистыми лишайниковыми, мохово-кустарничковыми, а также багульниково-ерниковыми и ольховыми сообществами.

Загрязнением уничтожена в первую очередь древесная растительность к юго-востоку от Норильска, что зафиксировано аэрофотосъёмками 1974, 1981, 1984 гг. и составленной по космическим снимкам Landsat 1995 г. картой состояния экосистем (Tutubalina, Rees, 1999; Tutubalina, Rees, 2001). При комплексных экспедиционных работах сибирских учёных в первые десятилетия XXI в., включая геохимические и дендрохронологические исследования, составлена карта растительности (Телятников, Пристяжнюк, 2014), зафиксированы границы зон разной степени нарушенности экосистем (Корец и др., 2014; Kirdyanov et al., 2020). Пострадали не только лесные, но также тундровые и болотные экосистемы: в частности, деградировали прежде занятые лишайниками бугры, кислотными дождями повреждены кустарничковые сообщества (Карпенко, 2006). Но при этом наряду с продолжающейся деградацией растительности стали появляться признаки частичного восстановления экосистем. В современных исследованиях при использовании космических снимков за разные временные периоды (1986–2001–2013) и выполнении по ним классификации основных типов поверхности (Nyland et al., 2017) обнаружено не только современное увеличение площадей лесов вне зоны действия комбината, но также «позеленение» в зоне воздействия, где прежде была зафиксирована деградация растительности. Выявляется специфика вторичной сукцессии — восстановление растительности после гибели.

Используемые материалы

В работе использовались данные съёмочных систем относительно высокого разрешения со спутников Landsat: Landsat-5/TM (*англ.* Thematic Mapper) (1984–2012), Landsat-7/ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus) (1999–2020), Landsat-8/OLI (*англ.* Operational Land Imager) (2012–2020). Преимуществом этих данных представляется беспрецедентная длительность наблюдений и достаточное для дешифрирования растительности на обширных территориях пространственное разрешение 30 м.

Исследуемая территория составляет более 44 тыс. км² и покрывается более чем пятью сценами. Поэтому было принято решение использовать возможности облачной платформы

Google Earth Engine. Она содержит обширный каталог спутниковых снимков, в том числе полную коллекцию снимков со спутников Landsat-4...-8 и Sentinel-2 разных уровней коррекции. Программный интерфейс Earth Engine API, основанный на языке программирования JavaScript, позволяет производить обработку и анализ снимков, а также их экспорт (Gorelick et al., 2017). Снимки сохраняются как в виде отдельных изображений, так и их коллекций, позволяющих производить фильтрацию, отбор или агрегацию большого количества данных.

Использовались снимки с радиометрической и атмосферной коррекцией Surface Reflectance (SR) (осуществлённой по алгоритму LEDAPS (*англ.* Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System) (Schmidt et al., 2013)), хранимые в базах данных Google Earth Engine. Были отобраны лишь изображения, полученные с 1 июля по 10 августа каждого года, так как этот срок включает в себя период максимальной вегетации. На район исследования удалось получить 1522 изображения за период 1984–2020 гг. Данные за 1992 г. не использовались из-за их низкого качества (высокая облачность). Перед тематическим анализом к 1522 изображениям SR в Google Earth Engine были применены битовые маски из канала Quality Assessment: удалены пиксели на участки, занятые плотными и перистыми облаками, а также покрытые снегом. Для снимков с разных спутников Landsat выполнена кросс-калибровка значений коэффициентов спектральной яркости по формулам, предложенным в работе (Roy et al., 2016).

Помимо снимков Landsat в анализ были включены однодневные композитные изображения NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) с разрешением 250 м и 8-дневные композиты спектральных каналов — продуктов обработки снимков MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra и Aqua.

Интерпретация результатов работ производилась с использованием доступных как веб-слои WMS (*англ.* Web Map Service) (в частности, в QGIS (Quantum GIS) — приложение, относящееся к классу пользовательских геоинформационных систем (ГИС)) фотокарт, составленных по снимкам сверхвысокого разрешения (ESRI Imagery, https://services.arcgis.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer), а также изображений с геопривязкой, доступных через сервис Google Планета Земля (*англ.* Google Earth). Для визуализации использовалась также географическая основа — полигоны и линии водных объектов из базы данных ESRI (<https://hub.arcgis.com/content/esri:world-water-bodies/about>).

Метод исследования — анализ трендов NDVI

Для анализа изменений растительности был выбран вегетационный индекс NDVI, рассчитываемый как нормализованная разница значений инфракрасного (760–900 нм для Landsat/TM, 770–900 нм для ETM+, 845–885 нм для OLI и 841–876 нм для MODIS) и красного (630–690 нм для Landsat/TM/ETM+, 640–670 нм для OLI и 620–670 нм для MODIS) каналов (Boye et al., 2017); основным индикатором изменений послужил временной тренд NDVI. Для анализа трендов целесообразно рассматривать весь массив имеющихся данных, отбирая максимальное за сезон значение индекса в каждом пикселе. В отличие от других метрик, в частности средних и медиан, максимальные значения NDVI практически не чувствительны к присутствию погрешностей в сериях данных — участков, не вырезанных маской облаков, дымов, снега и т. д., так как эти погрешности, как правило, отличаются более низкими значениями NDVI, чем растительность на пике вегетационного сезона.

По полученному ряду данных — максимальным значениям NDVI за лето каждого года — были проведены статистические тесты, в том числе простая линейная регрессия методом наименьших квадратов и анализ трендов Манна–Кендалла (Fassnacht et al., 2019).

Коэффициент детерминации линейной регрессии (r^2) показывает, насколько хорошо ряд наблюдений в каждом пикселе описывается линейной моделью, т. е. насколько равномерна динамика значений спектрального индекса. Бета-коэффициент при независимой переменной отражает степень изменений и их направленность.

Анализ трендов Манна–Кендалла, часто использующийся при анализе длинных рядов данных в гидрометеорологии, как и r^2 , чувствителен в первую очередь к постепенным, плавным изменениям и поэтому хорошо характеризует не внезапные (пожары, вырубки), а долгосрочные изменения, к которым можно отнести постепенное восстановление экосистем, подвергшихся промышленному загрязнению. В данном тесте используется показатель τ (коэффициент непараметрической корреляции) Кендалла, рассчитывающийся как:

$$\tau = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i < j} \text{sgn}(x_j - x_i),$$

где n — число наблюдений; x — значение индекса в год i и j ; sgn — функция, возвращающая 1 или -1 в зависимости от знака выражения в скобках.

Таким образом, осуществляется вычитание числа случаев с отрицательной динамикой из числа случаев с положительной динамикой в пределах определённого порога значимости, и в результате высокие или низкие значения функции указывают на наличие однонаправленных изменений, а близкие к нулю — на наличие флуктуаций (например, межгодовой динамики) или отсутствие изменений в целом. Получаемый показатель — относительный, в связи с чем его репрезентативность можно определить лишь статистически.

Необходимо отметить, что порог значимости изменений NDVI устанавливался вручную экспертным образом. Его наличие необходимо в связи с ограниченным числом снимков Landsat, особенно в 1980-е гг., а также различиями погодных условий. Эти факторы приводят к межгодовым различиям в значениях индекса, а также тому, что максимальные значения NDVI могут с большей вероятностью быть зафиксированы спутником в последние десятилетия, когда съёмка ведётся параллельно Landsat-7 и Landsat-8.

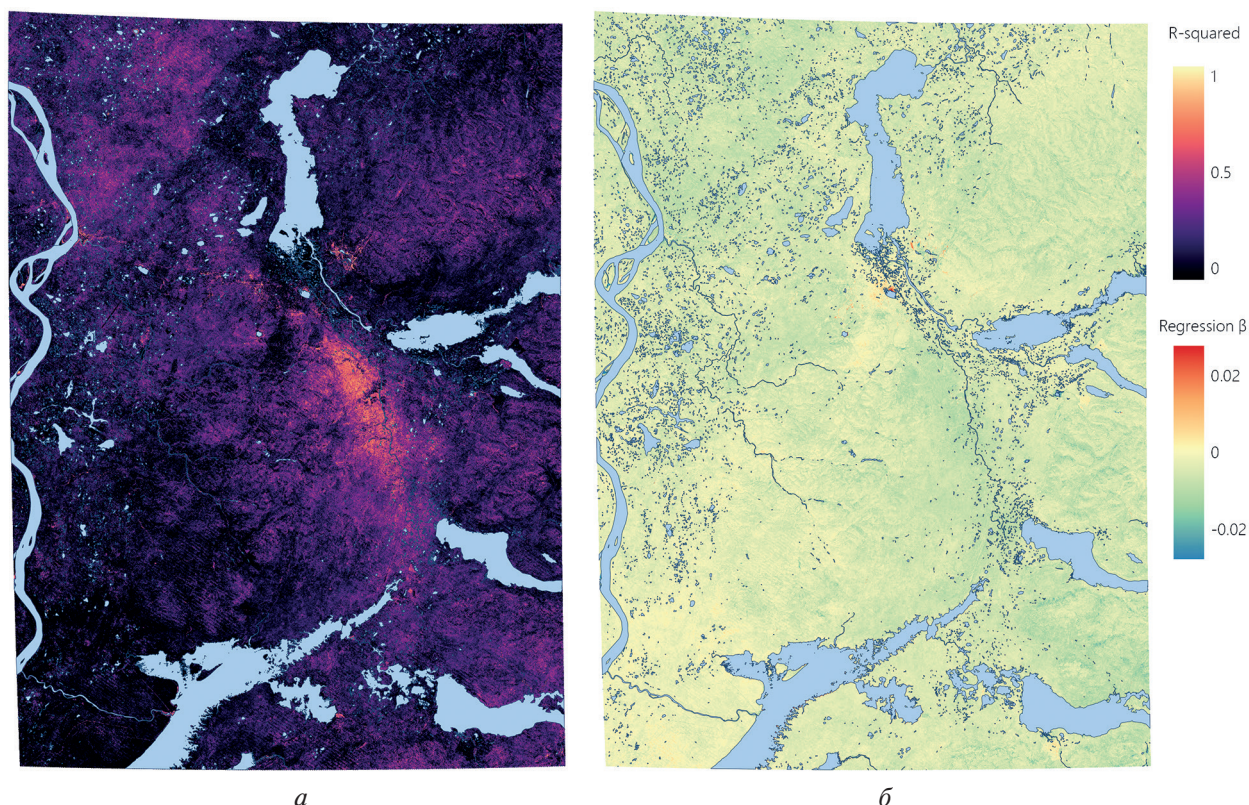


Рис. 1. Коэффициент детерминации (а) и бета-коэффициент линейной регрессии максимальных значений NDVI за 1985–2020 гг. (б). Здесь и далее водные объекты — данные ESRI

Таким образом, учитывались лишь изменения не меньше чем на 0,05. В случае если изменение не превышало данного значения, функция sgn возвращала значение 0. При анализе

данных MODIS с этим порогом, однако, значимого тренда для большинства пикселей выявлено не было, в связи с чем было принято решение по этим данным учитывать изменения в 0,02, давшие тренд, сходный с выделенным по данным Landsat. Причиной этого может быть более низкое пространственное разрешение MODIS: в один пиксель попадают и участки активного роста NDVI в понижениях рельефа, и более стабильные ровные и повышенные участки (в частности, торфяные болота, холмы).

Значимость тренда оценивалась по формуле:

$$z = \frac{\left| \frac{\sum_{i < j} \text{sgn}(x_j - x_i)}{\frac{1}{3} \sqrt{n(n-1) \cdot (2n+5)}} \right|}{1},$$

где z — процентиль функции нормального распределения. Значимым считался тренд в точках, где p -value превышал 0,95, остальные участки были вырезаны. В целом тренд согласуется с результатами линейной регрессии (рис. 1 (см. с. 173), 2), но его преимуществом стало совмещение оценки значимости и направления тренда в одном показателе.

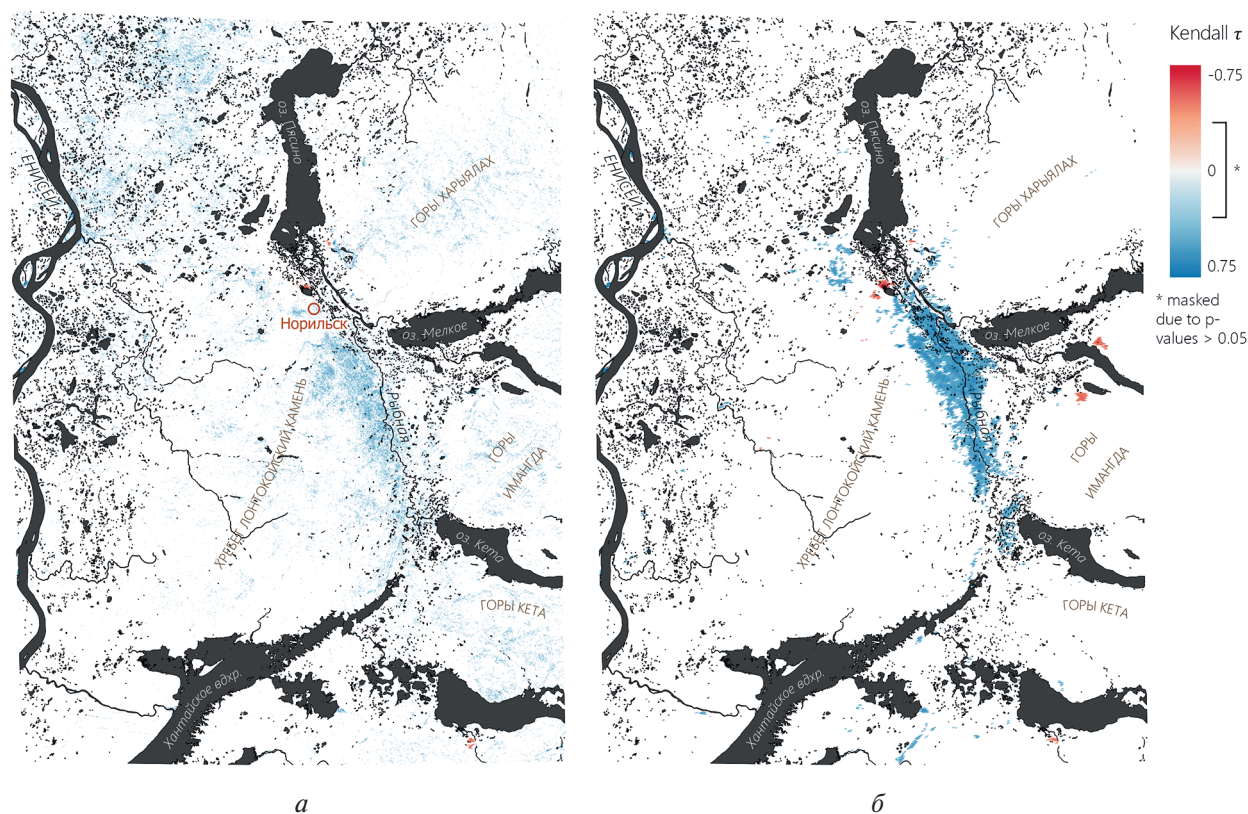


Рис. 2. Коэффициент непараметрической корреляции Манна – Кендалла (показан только значимый тренд) для NDVI по данным Landsat (а) и MODIS (б)

Анализ результатов

Районы со значимым трендом по снимкам со спутников Landsat

Анализ пространственной структуры тренда (см. рис. 2а) показал, что максимальный стабильный прирост NDVI отмечается в долине р. Рыбной к юго-востоку от Норильска, т.е. в прошлом наиболее пострадавшей от загрязнения территории, в то время как на остальной территории участки со значимым трендом встречаются лишь точечно. В связи с этим мож-

но сделать осторожный предварительный вывод об улучшении экологической ситуации в Норильском промышленном районе.

NDVI свидетельствует о распространении растительности, однако не может характеризовать восстановление коренных экосистем, в том числе погибших лиственничников: часто территории в ходе вторичных сукцессий занимаются пионерными видами. В частности, в районе Норильска деградированные территории, как правило, покрываются злаками и осоками (Карпенко, 2006).

Одним из способов обнаружения восстановления древесно-кустарникового покрова является анализ спектрального индекса влажности NDMI (англ. Normalized Difference Moisture Index — стандартизованный индекс различий увлажнённости), который представляет собой нормализованную разность ближнего и коротковолнового инфракрасного каналов (760–900 и 1550–1750 нм для Landsat/TM, 770–900 и 1550–1750 нм для ETM+, 850–880, 1570–1650 нм для OLI) и реагирует на изменения влажности наземного покрова. Таким образом, участки с высоким NDVI и ростом NDMI соответствуют распространению растительности, имеющей большее содержание влаги в тканях и активнее транспирирующей. Анализ тренда был проведён аналогично таковому для NDVI и выявил отдельные небольшие участки сильного положительного тренда. Распространение на этих участках древесно-кустарниковой растительности подтверждается современными снимками сверхвысокого разрешения (рис. 3).

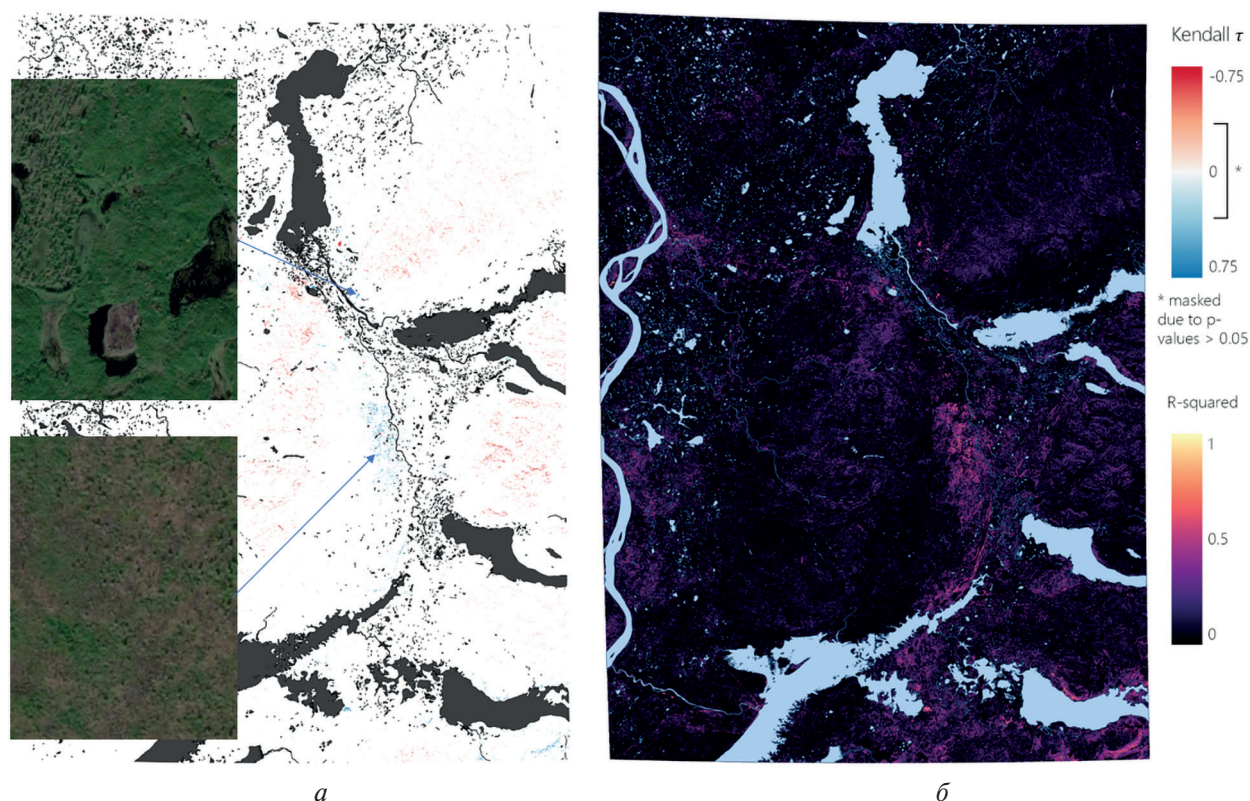


Рис. 3. Коэффициент непараметрической корреляции Манна–Кендалла (показан только значимый тренд) и фрагменты современных детальных снимков Digital Globe из мозаики ESRI (а), коэффициент детерминации линейной регрессии для NDMI (б)

При анализе разновременных пар снимков сверхвысокого разрешения GeoEye-1, WorldView-3, QuickBird-2, Pleiades наибольший рост NDVI выявлен для растительности в понижениях рельефа. К подобным участкам приурочено и повышение NDMI, что может быть связано как с лучшей водообеспеченностью и наличием таликов, так и с более благоприятными почвенными условиями, в том числе наличием нейтрализованных соединений азота. NDVI холмистых участков в зоне воздействия промышленности растёт не так сильно, как NDVI ложбин, его рост сопоставим с фоновыми условиями.

Анализ данных MODIS

Как указывалось, тренды NDVI были определены и по данным MODIS (см. рис. 2б). Преимущество спутников Terra и Aqua, оснащённых приборами MODIS, заключается в ежедневной съёмке Земли, позволяющей получать значительно большее количество данных, чем съёмочные системы спутников Landsat или Sentinel. Сравнение NDVI MODIS и NDVI Landsat-7/ETM+ на основе двух изображений за 26 июля 2019 г. выявило достаточно большие различия в этих индексах, связанные как со спектральными диапазонами съёмки, так и с размером пикселя. Обработка данных MODIS происходила аналогично обработке данных ETM+: был взят тот же летний период и выбраны максимальные значения NDVI на основе наборов данных 1-дневных композитных изображений NDVI (использование 8-дневных композитов показало худший результат — большую зашумлённость, поэтому они были исключены из анализа). Порог значимых изменений NDVI, как указывалось выше, был понижен. После этого был проведён анализ трендов. Совершено сравнение полученного по ETM+ тренда за 1985–2020 гг. с трендом, обрётённым по данным MODIS за 2000–2020 гг. Наибольший тренд по данным MODIS также наблюдается в долине р. Рыбной. Помимо этого, отрицательный тренд наблюдается у отдельных участков гарей.

Выводы

По результатам анализа тренда NDVI можно отметить постепенное восстановление растительности на территориях в районе Норильска (бассейне р. Рыбной), где она ранее погибла из-за промышленного загрязнения. Однако восстановление в пределах обширной территории с положительным трендом NDVI происходит преимущественно за счёт экспансии травянистой растительности на участках с деградирующей мерзлотой и хорошим дренажом, а древесно-кустарниковая возобновляется очень слабо. Об этом свидетельствуют данные сверхвысокого разрешения за последние 10–15 лет. Однако, вероятно, в современных климатических условиях это недостаточный срок для того, чтобы появление молодых деревьев и кустарников отразилось на текстурных метриках снимков сверхвысокого разрешения.

Полученные выводы могут быть уточнены в ходе полевых работ, а также планируемой классификации растительности района исследований по спектральным метрикам на основе данных со спутников Landsat и Sentinel-2 с учётом при обучении алгоритма территорий, где наблюдается значимый тренд NDVI.

Расчёт и анализ трендов спектральных индексов выполнен по проекту Российского фонда фундаментальных исследований № 18-05-60221. Анализ разновременных пар снимков сверхвысокого разрешения проведён при поддержке Фонда полярных исследований «Полярный Фонд».

Литература

1. Исаченко А. Г. Ландшафтная карта СССР // Современные проблемы географии: Науч. сообщения советских географов по программе 20-го Международ. геогр. конгресса. Лондон, 1964. М.: Наука, 1964. 416 с. С. 395–399.
2. Карпенко Л. В. Экологическая оценка состояния болотных экосистем фоновых территорий и в зоне техногенных воздействий // Вестн. Красноярского гос. аграр. ун-та, 2006. Вып. 14. С. 145–150.
3. Корец М. А., Рыжкова В. А., Данилова И. В. Использование ГИС для оценки состояния наземных экосистем Норильского промышленного района // Сибирский эколог. журн. 2014. № 6. С. 887–902.
4. Телятников М. Ю., Пристяжнюк С. А. Антропогенное влияние предприятий Норильского промышленного района на растительный покров тундры и лесотундры // Сибирский эколог. журн. 2014. № 6. С. 903–922.
5. Boyte S., Wylie B., Rigge M., Dahal D. Fusing MODIS with Landsat-8 data to downscale weekly normalized difference vegetation index estimates for central Great Basin rangelands, USA // GIScience and Remote Sensing. 2017. V. 55. Iss. 3. P. 376–399. DOI: 10.1080/15481603.2017.1382065.

6. Fassnacht F. E., Schiller C., Kattenborn T., Zhao X., Qu J. A Landsat-based vegetation trend product of the Tibetan Plateau for the time-period 1990–2018 // *Scientific Data*. 2019. V. 6(78). P. 1–11. DOI: 10.1038/s41597-019-0075-9.
7. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
8. Kirdyanov A. V., Krusic P. J., Shishov V. V., Vaganov E. A., Fertikov A. I., Myglan V. S., Barinov V. V., Browse J., Esper J., Ilyin V. A., Knorre A. A., Korets M. A., Kukarskikh V. V., Mashukov D. A., Onuchin A. A., Piermattei A., Pimenov A. V., Prokushkin A. S., Ryzhkova V. A., Shishikin A. S., Smith K. T., Taynik A. V., Wild M., Zorita E., Büntgen U. Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution // *Ecology Letters*. 2020. V. 23(19). P. 1827–1837. DOI: 10.1111/ele.13611.
9. Nyland K. E., Shiklomanov N. I., Streletskiy D. A. Climatic- and anthropogenic-induced land cover change around Norilsk, Russia // *Polar Geography*. 2017. V. 40(4). P. 257–272. DOI: 10.1080/1088937X.2017.1370503.
10. Roy D. P., Kovalskyy V., Zhang H. K., Vermote E. F., Yan L., Kumar S. S., Egorov A. V. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 185. P. 57–70. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024.
11. Schmidt G., Jenkerson C. B., Masek J., Vermote E., Gao F. Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS) Algorithm Description. U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1057. Reston, VA, 2013. 27 p. <https://doi.org/10.3133/ofr20131057>.
12. Serreze M. C., Barrett A. P., Stroeve J. C., Kindig D. M., Holland M. M. The emergence of surface-based Arctic amplification // *Cryosphere*. 2009. V. 3. P. 11–19. DOI: 10.5194/tc-3-11-2009.
13. Toutoubalina O., Rees G. Remote sensing of industrial impact on arctic vegetation around Noril'sk, northern Siberia: preliminary results // *Intern. J. Remote Sensing*. 1999. V. 20. P. 2979–2990. DOI: 10.1080/014311699211561.
14. Tutubalina O., Rees G. Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space: Noril'sk (1961–1999) // *Cold Regions Science and Technology*. 2001. V. 32. P. 191–203. DOI: 10.1016/S0165-232X(01)00049-0.

Assessment of changes in vegetation of the Norilsk industrial region with remote sensing data, based on the trend analysis of spectral indices

O. M. Zheleznyi, O. V. Tutubalina, V. I. Kravtsova

Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

E-mail: olgatut@mail.ru

The vegetation of the Norilsk industrial region, degraded over large areas under the influence of airborne industrial pollution, which varied at different stages of the metallurgical plant's activity, is influenced by climate warming. To assess changes in vegetation, imagery from Landsat-5, -7, -8 satellites is used for the entire period of their operation since 1984, their analysis carried out by means of the cloud platform Google Earth Engine. The imagery was masked from clouds and snow, and cross-calibration of the imaging systems of different satellites was performed. The assessment of the state of vegetation was based on the maximum values of NDVI in each pixel for the summer season. Statistical tests were carried out on this series of data, including simple linear regression and analysis of Mann-Kendall trends; so, the analysis of changes is based on NDVI trends. To better account for the changes in tree and shrub cover, a similar analysis of NDMI was carried out. Analysis of the spatial structure of the trend showed that the maximum stable growth of both indices is observed southeast of Norilsk, in the Rybnaya River valley, the area most affected by pollution in the past. Validation via modern very high-resolution images confirms the appearance of grass and shrubs in the areas of the strong positive trend. A similar study based on MODIS/Terra-Aqua data for 2000–2020 confirmed the existence of significant NDVI trend in the Rybnaya valley. Analysis of changes in vegetation based on very high resolution images showed that the greatest increase in NDVI is observed for vegetation in ravines and gullies.

Keywords: satellite images, vegetation index, NDVI, vegetation recovery, Norilsk, Arctic

Accepted: 20.01.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-170-178

References

1. Isachenko A. G., Landshaftnaya karta SSSR (Landscape map of the USSR), *Sovremennye problemy geografii: Nauchye soobshcheniya sovetskikh geografov po programme 20-go Mezhdunarodnogo geograficheskogo kongressa, London, 1964*, Moscow: Nauka, 1964, 416 p., pp. 395–399 (in Russian).
2. Karpenko L. V., Ecological assessment of the state of bog ecosystems of background territories and in the zone of technogenic impacts, *Vestnik Krasnoyarskogo argarnogo universiteta*, 2006, Vol. 14, pp. 145–150 (in Russian).
3. Korets M. A., Ryzhkova V. A., Danilova I. V., GIS-Based Approaches to the Assessment of the State of Terrestrial Ecosystems in the Norilsk Industrial Region, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 6, pp. 643–653.
4. Telyatnikov M. Y., Prystyazhnyuk S. A., Anthropogenous Influence of Norilsk Industrial Area on Plant Vegetation Cover of the Tundra and Forest Tundra, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 6, pp. 654–668.
5. Boyte S., Wylie B., Rigge M., Dahal D., Fusing MODIS with Landsat-8 data to downscale weekly normalized difference vegetation index estimates for central Great Basin rangelands, USA, *GIScience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 55, Issue 3, pp. 376–399, DOI 10.1080/15481603.2017.1382065.
6. Fassnacht F. E., Schiller C., Kattenborn T., Zhao X., Qu J., A Landsat-based vegetation trend product of the Tibetan Plateau for the time-period 1990–2018, *Scientific Data*, 2019, Vol. 6(78), pp. 1–11, DOI: 10.1038/s41597-019-0075-9.
7. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 202, pp. 18–27, DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
8. Kirdyanov A. V., Krusic P. J., Shishov V. V., Vaganov E. A., Fertikov A. I., Myglan V. S., Barinov V. V., Browse J., Esper J., Ilyin V. A., Knorre A. A., Korets M. A., Kukarskikh V. V., Mashukov D. A., Onuchin A. A., Piermattei A., Pimenov A. V., Prokushkin A. S., Ryzhkova V. A., Shishikin A. S., Smith K. T., Taynik A. V., Wild M., Zorita E., Büntgen U., Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution, *Ecology Letters*, 2020, Vol. 23(19), pp. 1827–1837, DOI: 10.1111/ele.13611.
9. Nyland K. E., Shiklomanov N. I., Streletskiy D. A., Climatic- and anthropogenic-induced land cover change around Norilsk, Russia, *Polar Geography*, 2017, Vol. 40(4), pp. 257–272, DOI: 10.1080/1088937X.2017.1370503.
10. Roy D. P., Kovalskyy V., Zhang H. K., Vermote E. F., Yan L., Kumar S. S., Egorov A. V., Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 185, pp. 57–70, DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024.
11. Schmidt G., Jenkerson C. B., Masek J., Vermote E., Gao F., *Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS) Algorithm Description, U. S. Geological Survey Open-File Report 2013–1057*, Reston, VA, 2013, 27 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20131057>.
12. Serreze M. C., Barrett A. P., Stroeve J. C., Kindig D. M., Holland M. M., The emergence of surface-based Arctic amplification, *Cryosphere*, 2009, Vol. 3, pp. 11–19, DOI: 10.5194/tc-3-11-2009.
13. Toutoubalina O., Rees G., Remote sensing of industrial impact on arctic vegetation around Noril'sk, northern Siberia: preliminary results, *Intern. J. Remote Sensing*, 1999, Vol. 20, pp. 2979–2990, DOI: 10.1080/014311699211561.
14. Tutubalina O., Rees G., Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space: Noril'sk (1961–1999), *Cold Regions Science and Technology*, 2001, Vol. 32, pp. 191–203, DOI: 10.1016/S0165-232X(01)00049-0.