ЛЕСОВЕДЕНИЕ, ЛЕСОВОДСТВО, ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ, АГРОЛЕСОМЕЛИОРАЦИЯ, ОЗЕЛЕНЕНИЕ, ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ И ТАКСАЦИЯ/FORESTRY, FORESTRY, FOREST CROPS, AGROFORESTRY, LANDSCAPING, FOREST PYROLOGY AND TAXATION

DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА ЗЕЛЕНЫХ НАСАЖДЕНИЙ ГОРОДОВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ В ПЕРИОД ВЕГЕТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ

Научная статья

Рунова Е.М.[1, *], Степанова О.А.[2]
[1] ORCID : 0000-0001-6178-4038;
[1, 2] Братский государственный университет, Братск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (runova0710[at]mail.ru)

Аннотация

В статье изложены результаты исследований данных спутниковых снимков высокого пространственного разрешения для оценки изменения динамики нормализованного вегетационного индекса (NDVI) зеленых насаждений городов Иркутской области на примере Саянска, Ангарска, Тулуна за 2013-2022 г. в период максимальной вегетационной активности. Значения NDVI (июль – август) получены на основе многозональных космических снимков Landsat 8 OLI2. В открытых источниках нет данных о состоянии зеленых насаждения исследуемых городов, но набор снимков в течение всего анализируемого периода позволяет изучить особенности активности вегетации зеленых насаждений на исследуемых территориях. Установлены значения NDVI в течение исследуемого периода, составлены тренды движения и выбраны максимальные и минимальные значения по каждому городу. При этом, несмотря на то, что спутниковые снимки имеют большой захват территории, а города находятся в одном регионе, максимальные и минимальные значения индекса NDVI разнятся по годам и общие закономерности, связанные с погодными условиями (средимесячной температурой и количеством осадков) не выявлены. Анализ значений вегетационного индекса позволил получить уравнения графиков функций тренда, которые характеризуют характер изменения индекса, которые характеризуют изменение NDVI в летние месяцы в течение 9 лет. Несмотря на общие характерные сходства исследуемых городов и факт нахождения их в одном регионе исследование вегетационного индекса зеленых насаждений не выявило общих значений по годам, похожих трендов и сходства состояния зеленых насаждений.

Ключевые слова: вегетационный индекс NDVI, Landsat OLI, состояние зеленых насаждений, геоинформационные системы.

AN ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF THE VEGETATION INDEX OF GREEN SPACES IN IRKUTSK REGION CITIES DURING THE PERIOD OF VEGETATION ACTIVITY

Research article

Runova Y.M.[1, *], Stepanova O.A.[2]
[1] ORCID : 0000-0001-6178-4038;
[1, 2] Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation

* Corresponding author (runova0710[at]mail.ru)

Abstract

The article presents the results of research of high spatial resolution satellite imagery data for estimation of changes in the normalized vegetation index (NDVI) dynamics of green areas of Irkutsk Oblast cities on the example of Sayansk, Angarsk, Tulun for 2013-2022 during the period of maximum vegetation activity. NDVI values (July-August) were obtained on the basis of Landsat 8 OLI2 multispectral space images. There are no data on the state of green areas of the studied cities in open sources, but the set of images during the whole analysed period allows studying the peculiarities of vegetation activity of green areas in the studied territories. NDVI values during the study period were established, movement trends were compiled, and maximum and minimum values were selected for each city. At the same time, despite the fact that satellite images have a large coverage of the territory and the cities are located in the same region, the maximum and minimum values of NDVI index are different by year and general patterns related to weather conditions (monthly temperature and precipitation) are not revealed. The analysis of vegetation index values allowed to obtain equations of trend function plots, which characterize the nature of the index change, which describe the change of NDVI in summer months during 9 years. Despite the general characteristic similarities of the surveyed cities and the fact that they are located in the same region, the study of the vegetation index of green spaces did not identify common values by years, similar trends and similarities in the condition of green spaces.

Keywords: NDVI vegetation index, Landsat OLI, green areas condition, geoinformation systems.

Введение

Дистанционный мониторинг лесов от нелегальной рубки ведется с 2013 года. Сегодня система слежения охватывает свыше 250 млн. га в 40 регионах страны. Но данных по целенаправленной системной работе с зелеными насаждениями городов с использованием дистанционных методов исследования крайне мало. Источниками данных для анализа и мониторинга используются снимки спутников Sentinel, Landsat и группы российских спутников Конопус – В. Для оценки общего состояния зеленых насаждений используется широко известный вегетационный индекс NDVI,

рассчитывающийся на основе данных красного и ближнего инфракрасного каналов. Проблеме корректного расчёта NDVI для конкретных спутников уделяется повышенное внимание [1], [2], [3], [4]. Для получения и анализа индекса NDVI в открытом доступе имеются несколько пакетов программ (QGIS, SeaDAS), с помощью которых можно обрабатывать данные, полученные с наиболее популярных спутниковых сенсоров: Landsat, MODIS и AVHRR.

Оценка изменчивости NDVI на имеющейся базе данных показала, что сенсоры спутников Landsat-8 Landsat-9 показали наименьшую погрешность и отклонения. Для этого рассчитывались стандартные отклонения величин NDVIs для каждого спутника относительно среднего значения. При дальнейшем составлении математической модели анализа точности датчики Landsat показывали наименьшие отклонения и давали более точные результаты, а данные российского спутника Канопус-В показывали наибольшую погрешность и давали данные с большими отклонениями [7], [8]. Тем не менее среди российских публикаций можно найти методические аспекты оценки состояния различных природных объектов на основе данных спутниковой съемки с аппарата Канопус-В [9], [10].

В перспективе применение инструментария геоинформационных технологий при мониторинге состояния зеленых насаждений городов Иркутской области может давать объективную картину актуального состояния растительности практически ежегодно, что невозможно сделать при мониторинге состояния зеленых насаждений наземным способом. Как правило, мониторинг зеленых насаждений проводится раз в 5 или 10 лет при условии наличия службы зеленого хозяйства. Также анализ динамики индекса NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) зеленых насаждений городов Иркутской области поможет оперативно оценивать видовой состав и состояние зеленых насаждений. При современном уровне развития технологий дистанционного зондирования Земли применение NDVI становится важным инструментом для получения своевременных и актуальных данных о зеленых насаждениях.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования в статье является вегетационный индекс NDVI зеленых насаждений городов Иркутской области. Города, зеленые насаждения которых исследуются в статье, равномерно распределены по территории Иркутской области, которая является крупнейшим районом, имеющим важное экономическое значение в экономике Российской Федерации. Площадь Иркутской области составляет 774 846, при этом удельный вес городского населения 78, 25% от общей численности населения. На территории области расположены 446 муниципальных образований, 54 поселка и 1488 сельских населенных пунктов [11].

Для исследования состояния зеленых насаждений методами дистанционного зондирования выбраны промышленные города Иркутской области: Ангарск, Тулун и Саянск.

Ангарск является образцовым городом по озеленению и благоустройству, который неоднократно становился победителем всероссийского конкурса по благоустройству и озеленению (2003, 2005,2008 годы). Ангарск – промышленный город с предприятиями нефтехимической, химической промышленности. На долю города приходится 13,2 % промышленной продукции Иркутской области [12].

Тулун – крупный центр лесной и лесохимической промышленности, а также центр угледобывающей промышленности Иркутской области. На территории Тулунского района находятся два действующих угольных разреза (Мугунский и Азейский), в активный период добывающие до 25 тысяч тонн угля в сутки [13].

Саянск – один из самых молодых промышленных городов Иркутской области. Саянск является одним из лидеров региона в плане создания комфортной городской среды. Основными предприятиями города являются ОАО «Саянскхимпласт», ООО «Саянский бройлер», ООО «Химпромстрой». Город является зеленым и благоустроенным [14].

Отличительной особенностью малых и средних городов Иркутской области заключается в том, что при городской застройке оставлялись довольно большие массивы таежных лесов с преобладанием хвойных пород (сосна обыкновенная, лиственница сибирская, пихта сибирская, ель сибирская, сосна кедровая сибирская). Среди лиственных пород преобладают береза повислая, осина. Лишь в конце XX столетия в этих городах организованно стали проводить озеленение и использование морозоустойчивых интродуцентов (тополь бальзамический). В большинстве городов не проводится инвентаризация, а также отсутствует мониторинг состояния зеленых насаждений. Поэтому для начала оценки состояния зеленых насаждений было решено использовать материалы дистанционного зондирования, а затем переходу к инвентаризации городских посадок.

Снимки, используемые для работы над данным исследованием, получены из базы снимков Национальной геологической службы США по каждому населенному пункту и за каждый исследуемый год. Для анализа вегетационного индекса NDVI за указанный период в ручном режиме отобраны снимки, датированные с 15 июля по 15 августа с 2013 по 2022 год. При анализе снимков не применялись инструменты облачной коррекции, поэтому весь собранный для работы материал датирован днями, когда была ясная безоблачная погода [15].

На рис. 1 изображена цветовая палитра распределения значений NDVI, которая применялась в процессе создания визуальных изображений для дальнейшей работы. Шаблон в виде файла формата txt получен из контента по работе с QGIS на видеохостинге YouTube [16].

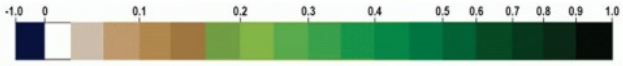

Рисунок 1 - Шаблон цветовой палитры распределения значения NDVI

DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.1

Анализ проводился в программе QGIS версии 3.30.3 (актуальная версия на дату написания статьи). Так как получаемые результаты индекса NDVI полученные при помощи модуля Processing Saga NextGen Provider давали нестабильные результаты, каждый индекс рассчитывался вручную при помощи калькулятора растров. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики исследуемых городов и фактически исследуемые площади.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика исследуемых городов

DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.2

Город	Год основания	Население, человек	Официальная площадь, км^2	Фактически исследуемая площадь, км^2
Ангарск	1948	221296	294	116,79
Тулун	1927	38440	128	79,27
Саянск	1970	35561	83	20,69

Среди исследуемых городов Тулун является самым старым, Саянск, как говорилось ранее, самым молодым. Также в городе Тулун визуально наблюдается самый большой частный сектор. Ангарск обладает самой большой численностью населения и площадью городской территории [17].

Вегетационный индекс NDVI рассчитывался по формуле:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR}-\mathrm{RED}}{\mathrm{NIR}+\mathrm{RED}} \quad (1)$$

Где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра RED – отражение в красной области спектра.

Основные результаты и обсуждение

На рис. 2 изображены фактически исследованные участки территории городов, так как были исключены промышленные и производственные зоны.

Рисунок 2 - Изображение фактически исследованных городских территорий

DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.3

Таким образом, в Ангарске жилые районы занимают 40% от общей площади, в г. Тулун – 62%, и в г. Саянск – 25%, соответственно, методом картографического обследования подтверждает статус крупных промышленных центров, а также острую потребность в особом внимании к вопросам озеленения и аналитике состояния зеленых насаждений.

Табл. 2 представляет собой сводные данные полученных вегетационных индексов объектов исследования за весь период, а также соответствующих периоду средней температуры и осадков.

Таблица 2 - Сводные значения вегетационного индекса NDVI за 2013-2022 годы

DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.4

Год (июль/август)	Ангарск			Тулун			Саянск	
	NDVI	Средняя температура за июль - август, град. С^o	Среднемесячное количество осадков за июль - август, мм	NDVI	Средняя температура за июль - август, град. С^o	Среднемесячное количество осадков за июль - август, мм	NDVI	Средняя температура за июль - август, град. С^o
2013	0,694936	17,5	27,5	0,969006	16,3	54	0,651735	21,2

Год (июль/август)	Ангарск			Тулун			Саянск	
	NDVI	Средняя температура за июль - август, град. С°	Среднемесячное количество осадков за июль - август, мм	NDVI	Средняя температура за июль - август, град. С°	Среднемесячное количество осадков за июль - август, мм	NDVI	Средняя температура за июль - август, град. С°
2014	0,557964	17,1	65,5	0,855257	17	80,5	0,656234	21,2
2015	0,545343	19,5	77	0,679107	18,4	79	0,703222	23
2016	0,569213	17,8	119	0,591032	17,6	79,5	0,995595	22
2017	0,994574	17,2	82,5	0,502957	17	46,5	0,540287	21,2
2018	0,853328	17,5	65,5	0,653734	16,4	108	0,927727	21,2
2019	0,684415	17,5	152	0,653734	17,4	156	0,533797	21,3
2020	0,515502	17,8	160	0,804511	17,2	111,5	0,994521	21,3
2021	0,867745	17,4	136,5	0,989254	17,7	129,5	0,809956	18,8
2022	0,817388	17,1	84	0,615692	14,7	54	0,651735	21,2

По результатам анализа табл. 2 составлены графики и общие тренды индекса NDVI и произведено визуальное сравнение изображений с минимальным и максимальным значением NDVI.

Несмотря на то, что исследуемые города имеют очень похожие географические характеристики, находятся в одном регионе тренды NDVI, максимальные и минимальные значения индекса не совпадают за период 2013-2022 г. На рисунках 3-5 представлены графики изменения индекса.

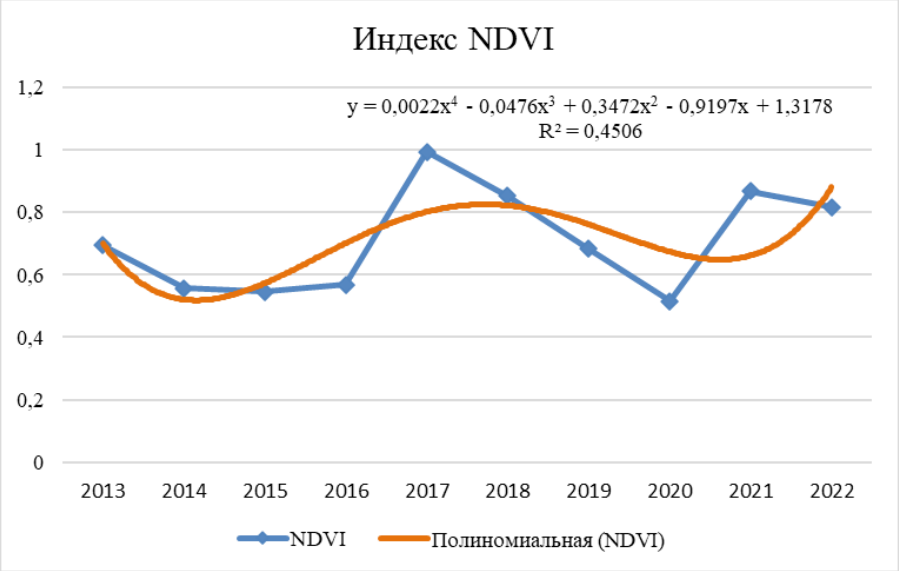

Рисунок 3 - График индекса NDVI г. Ангарск за исследуемый период
DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.5

График индекса по Ангарску представляет собой ломаную кривую с пиковым самым высоким значением в 2017 и падением в 2020 годах. В связи с этой картиной общий тренд индекса имеет волнообразную форму.

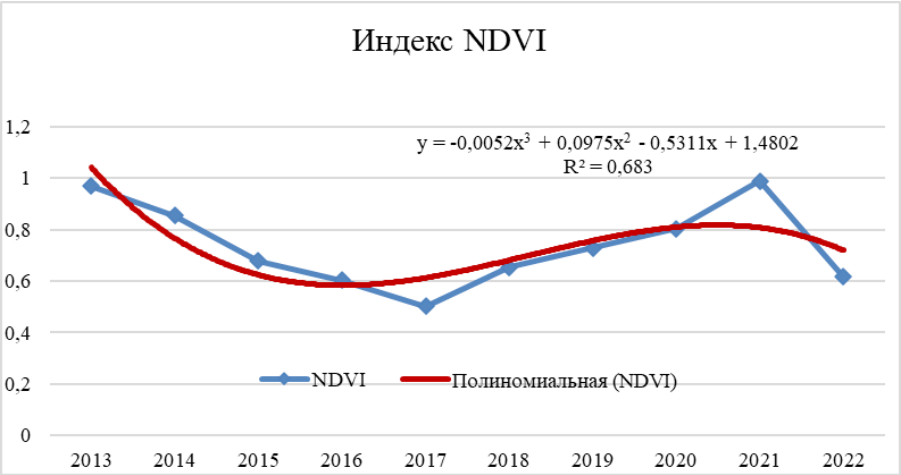

Рисунок 4 - График индекса NDVI г. Тулун за исследуемый период
DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.6

График индекса в Тулуне не имеет ярко выраженных скачков по годам и в целом наблюдается гармоничная картина общего тренда NDVI.

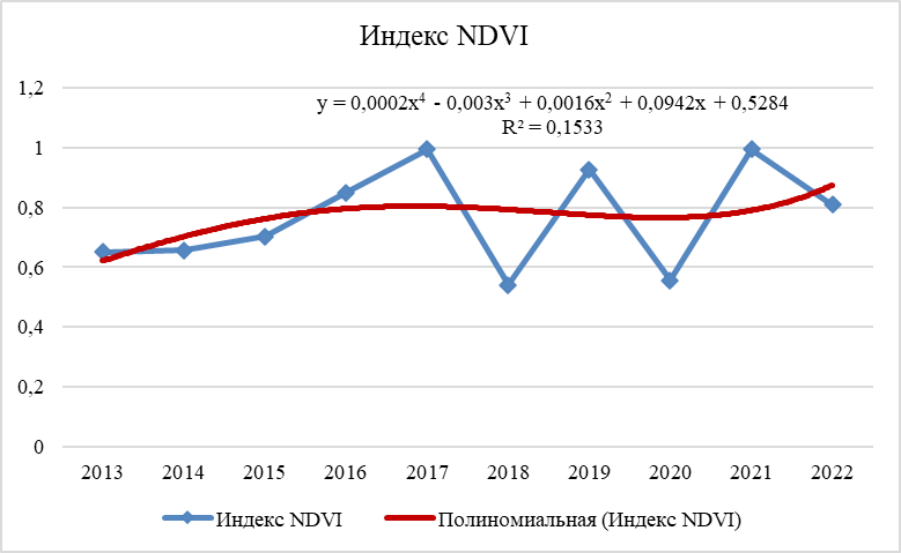

Рисунок 5 - График индекса NDVI г. Саянск за исследуемый период
DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.7

График индекса NDVI г. Саянска неоднородный с резкими периодами снижения, а 2018 и 2020 году, хотя в общей картине графика тренд выглядит позитивным за счет годов, когда он приближался к 1.

Ярко выраженных скачков среднемесячной температуры за 2013-2022 года по метеоданным, приведенным в табл. 2 не наблюдалось. Все показатели имеют незначительные колебания вокруг одних и тех же значений. Среднемесячная температура июля/августа по Ангарску за исследуемый период по Ангарску – 17°С, в Тулуне – 16-18°С, в Саянске – 21-22°С.

На рис. 6 приведен обобщающий график значения индекса NDVI по исследуемым городам за период с 2013 по 2022 годы.

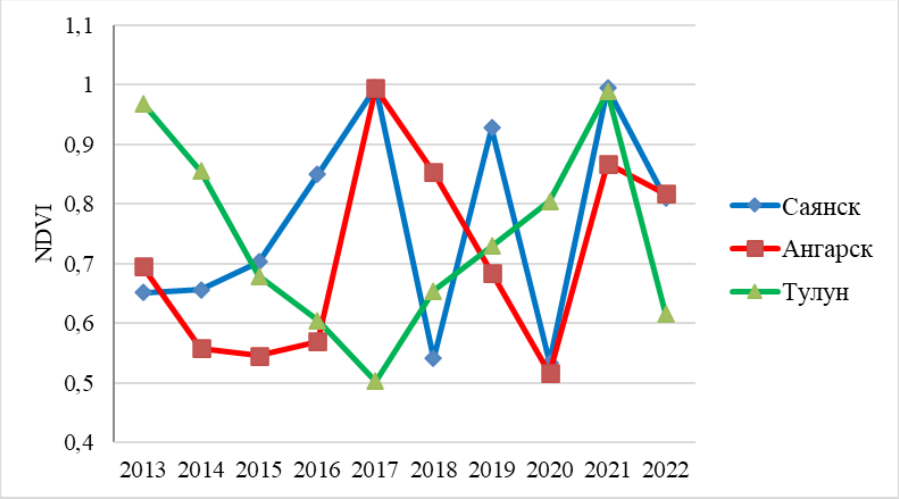

Рисунок 6 - Обобщенный график индекса NDVI по исследуемым городам
DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.8

На рис 6. Видно, что графики вегетационного индекса зеленых насаждений Саянска и Ангарска имеют общие тенденции к повышению и понижению, а динамика индекса NDVI в г. Тулун существенно отличается от первых двух городов.

На рис. 7-9 в качестве примера приведена зависимость индекса NDVI с количеством осадков, выпавших за месяц исследования, среднемесячной температурой за июль – август и суммарным индексом погоды, который рассчитывается как произведение относительной температуры за месяц исследования и относительного количества осадков за тот же период по Ангарску.

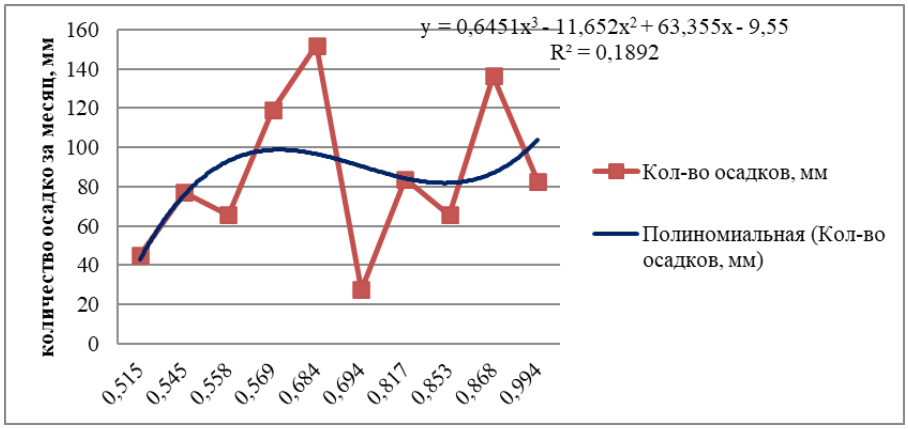

Рисунок 7 - Соотношение индекса NDVI с количеством осадков
DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.9

Как видно из рис. 7 количество осадков и величина индекса NDVI имеют слабую корреляцию между собой.

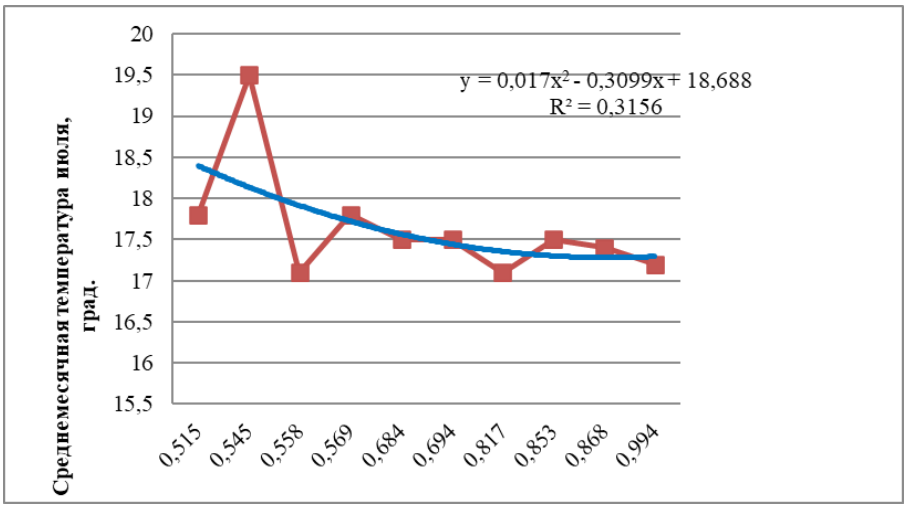

Рисунок 8 - Соотношение индекса NDVI со среднемесячной температурой
DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.10

Данные рис. 8 показывают, что взаимосвязь между среднемесячной температурой воздуха и индексом NDVI более тесная (коэффициент детерминации R^2=0,315).

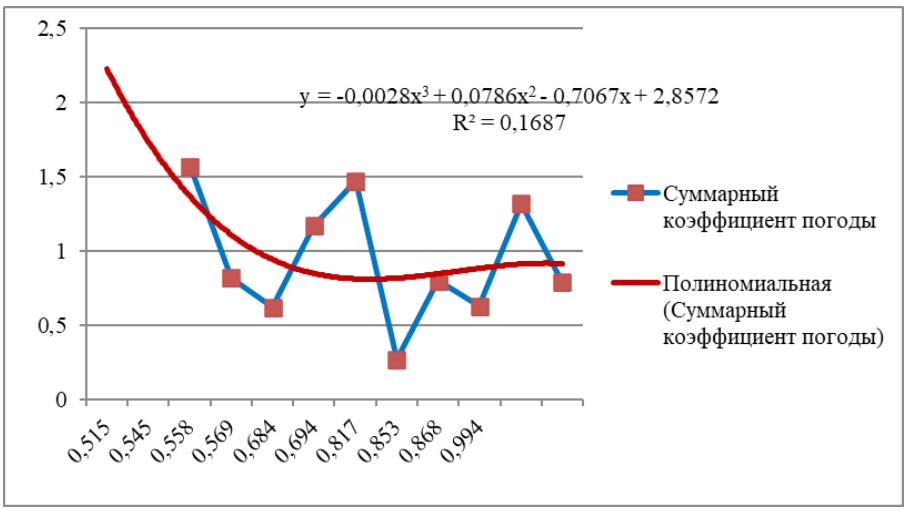

Рисунок 9 - Соотношение индекса NDVI с суммарным коэффициентом погоды
DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.11

Также незначительная корреляция между суммарным коэффициентом погоды и величиной вегетационного индекса.

Многие авторы отмечают отрицательную реакцию вегетационного индекса на повышение температуры и положительную корреляцию с влажностью воздуха и почвы [18]. В наших исследованиях получить аналогичные результаты не удалось.

Анализируя визуальную иллюстрацию индексов NDVI по максимальным и минимальным значениям (рис. 10-12) кардинально меняется представление об использовании этого инструмента для исследования зеленых насаждений промышленных городов.

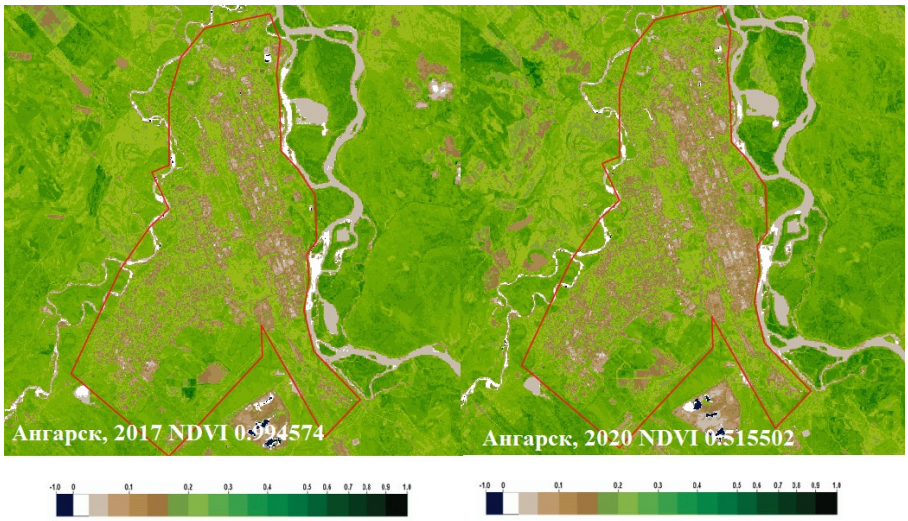

Рисунок 10 - Сравнение максимального и минимального значения индекса NDVI за исследуемый период в Ангарске
DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.12

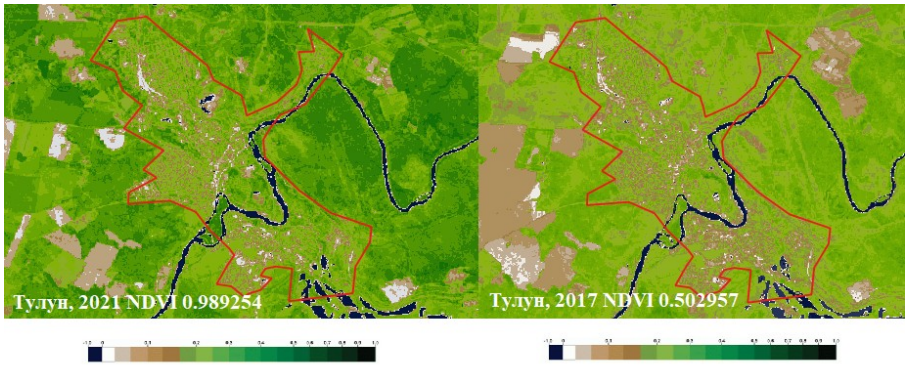

Рисунок 11 - Сравнение максимального и минимального значения индекса NDVI за исследуемый период, г. Тулун
DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.13

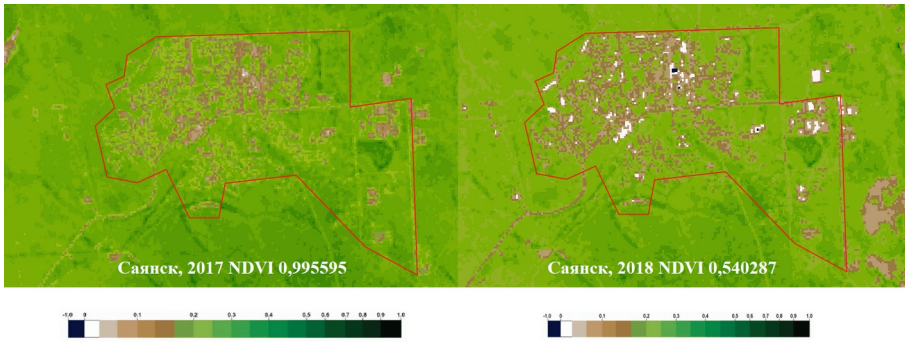

Рисунок 12 - Сравнение максимального и минимального значения индекса NDVI за исследуемый период, г. Саянске
DOI: https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11.14

Визуальная разница между максимальным и минимальным значением очевидно и ярко выражена, что очевидно показывают иллюстрации.

Заключение

Ко всем иллюстрациям были применены одинаковые настройки стиля, но при этом одно и то же максимальное значение индекса 0,99 в Саянске и Тулуне выглядит совершенно по-разному. При исследовании состояния зеленых насаждений необходимо учитывать факторы, которые касаются окружающих этот город производств. Из-за такой большой визуальной разницы в картине NDVI можно предположить, что основной фактор влияния на характеристики

индекса могут оказывать многолетние атмосферные выбросы производств, которые повлияли на почвенный состав и растительность. Так как индекс NDVI оценивает общее качество растительности на исследуемой территории (плотность растительности на исследуемой территории и жизнеспособность насаждений в целом), то появляется возможность исследовать жизненной состояние растительности, в том числе и лесопатологическое и общее санитарное состояние под воздействием промышленного загрязнения. Растительность зеленых насаждений исследуемых городов можно охарактеризовать, как разреженную в периоды с минимальным значением NDVI (наблюдаются большие участки контуров дорог и других открытых территорий). Применение индекса NDVI для исследования зеленых насаждений городов, которые являются центрами промышленных производств необходимо осуществлять индивидуально по границе каждого населённое пункта, т.к. общие числовые характеристики канала не дают объективной картины на территории города. Поэтому следующим этапом исследования является инвентаризация зеленых насаждений городов наземным способом по утвержденным методикам. Но в таких городах, как Тулун, Саянск не проводилась наземная инвентаризация зеленых насаждений, поэтому первоначально возможно использовать данные ДЗЗ, которые доступны для любых территорий.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Евдокимов С. И. Использование данных дистанционного зондирования Земли в региональном экологическом мониторинге / С. И. Евдокимов, С. Г. Михалап // Социально-политические и эколого-хозяйственные проблемы развития Балтийского региона. Материалы международной научно-практической конференции 19–20 ноября 2015 года. — Псков: Псковский государственный университет, 2015. — С. 203–208
2. Лиджиева Н. Ц. Опыт применения индекса вегетации (NDVI) для определения биологической продуктивности фитоценозов аридной зоны на примере региона Черные земли / Н. Ц. Лиджиева, С. С. Уланова, Н. Л. Федорова // Известия Саратовского университета. — Сер. Химия. Биология. Экология. — 2012. — V. 12. — Вып. 2. — С. 94–96.
3. Сочилова Е.Н. Оценка запасов фитомассы лесных пород по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения (на примере лесов Ханты-Мансийского АО) / Е.Н. Сочилова, Н.В. Сурков, Д.В. Ершов, В.А. Хамедов // Вопросы лесной науки. — 2018. — Т. 1 (1). — С. 1–23.
4. Сочилова Е.Н. Картографирование классов бонитета лесов Приморского края на основе спутниковых изображений и данных о характеристиках рельефа / Е.Н. Сочилова, Н.В. Сурков, Д.В. Ершов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15. — № 5. — С. 96–109.
5. Дубенок Н.Н. Динамика лесов заповедника «Кологривский лес» / Н.Н. Дубенок, П.В. Чернявин, А.В. Лебедев [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. — 2016. — № 3 (31). — С. 5–18.
6. Лупян Е. А. «Дни космической науки – 2010» дистанционное зондирование Земли / Е. А Лупян., О. Ю. Лаврова, С. А. Барталев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2010. — Т. 7. — № 4. — С. 319–328.
7. Albarakat R. Comparison of Normalized Difference Vegetation Index Derived from Landsat, MODIS, and AVHRR for the Mesopotamian Marshes between 2002 and 2018 / R. Albarakat, V. Lakshmi // Remote Sensing. — 2019. — Vol. 11. — ID 1245. — 16 p. — DOI: 10.3390/rs11101245.
8. Алексанин А.И. Влияние условий наблюдения на точность расчёта вегетационного индекса растительности NDVI по данным дистанционного зондирования Земли / А.И. Алексанин, А.Н. Тимофеев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2023. — Т. 20. — №1. — С. 133–143. — DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-133-143
9. Есть ли отечественные аналоги Sentinel-2 и Landsat? // Экосистема цифровых решений для сельскохозяйственной отрасли. — URL: https://direct.farm/post/yest-li-otechestvennyye-analogi-sentinel2-i-landsat-21776 (дата обращения: 27.06.2023).
10. Сидоренков В.М. Методические аспекты оценки запаса воды в снеге на основе данных со спутника Канопус-В / В.М. Сидоренков, Д.О. Астапов, Ю.С. Ачиколова [и др.] // Лесохозяйственная информация. — 2023. — № 2. — С. 55–65. — DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.04
11. Официальный портал Иркутской области. — URL: https://irkobl.ru (дата обращения: 27.06.2023).
12. Официальный сайт Ангарского городского округа. — URL: https://angarsk-adm.ru/ekonomika/ (дата обращения: 27.06.2023).
13. Прибайкалье. Город Тулун. — URL: https://www.pribaikal.ru/tulun/tulun-o-gorode.html (дата обращения: 27.06.2023).
14. Официальный сайт Администрации городского округа Муниципального образования «город Саянск». — URL: https://www.admsayansk.ru (дата обращения: 27.06.2023).
15. Landsat Science. – Landsat programme site. — URL: http://landsat.gsfc.nasa.gov/ (accessed: 26.06.2023).
16. ГИС QGIS 3 – Расчет индекса NDVI. — URL: https://youtube/LSUzEdx7fkQ (дата обращения: 27.06.23)

17. Винокуров М.А. Города Иркутской области / М.А. Винокуров, А.П. Суходолов. — Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2011. — 43 с.

18. Рулев А.С. Анализ сезонной динамики NDVI естественной растительности Заволжья Волгоградской области / А.С. Рулев, С.Н. Канищев, С.С. Шинкаренко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2016. — Т. 13. — № 4. — С. 113–123. — DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-113-123

Список литературы на английском языке / References in English

1. Evdokimov S. I. Ispol'zovanie dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli v regional'nom ekologicheskom monitoringe [The Use of Earth Remote Sensing Data in Regional Environmental Monitoring] / S. I. Evdokimov, S. G. Mihalap // Social'no-politicheskie i ekologo-hozyajstvennye problemy razvitiya Baltijskogo regiona. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii 19–20 noyabrya 2015 goda [Socio-political, Ecological and Economic Problems of the Baltic Region Development. Materials of the International Scientific and Practical Conference on November 19-20, 2015]. — Pskov: Pskov State University, 2015. — P. 203–208 [in Russian]

2. Lidzhieva N. C. Opyt primeneniya indeksa vegetacii (NDVI) dlya opredeleniya biologicheskoj produktivnosti fitocenozov aridnoj zony na primere regiona CHernye zemli [The Experience of Using the Vegetation Index (NDVI) to Determine the Biological and Genetic Characteristics of the Arid Zone on the Example of the Black Lands Region] / N. C. Lidzhieva, S. S. Ulanova, N. L. Fedorova // Izvestiya Saratovskogo universiteta [Proceedings of the Saratov University]. — Ser. Himiya. Biologiya. Ekologiya [Ser. Chemistry. Biology. Ecology]. — 2012. — V. 12. — No. 2. — P. 94–96 [in Russian].

3. Sochilova E.N. Ocenka zapasov fitomassy lesnyh porod po sputnikovym izobrazheniyam vysokogo prostranstvennogo razresheniya (na primere lesov Hanty-Mansijskogo AO) [Estimation of Forest Phytomass Reserves Based on High Spatial Resolution Satellite Images (on the example of forests of Khanty-Mansiysk AO)] / E.N. Sochilova, N.V. Surkov, D.V. Ershov, V.A. Hamedov // Voprosy lesnoj nauki [Issues of Forest Science]. — 2018. — V. 1 (1). — P. 1–23 [in Russian].

4. Sochilova E.N. Kartografirovanie klassov boniteta lesov Primorskogo kraya na osnove sputnikovyh izobrazheniĭ i dannyh o harakteristikah rel'efa [Mapping of Forest Bonus Classes in Primorsky Krai Based on Satellite Images and Data on Terrain Characteristics] / E.N. Sochilova, N.V. Surkov, D.V. Ershov [et al.] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. — 2018. — V. 15. — № 5. — P. 96–109 [in Russian].

5. Dubenok N.N. Dinamika lesov zapovednika «Kologrivskij les» [Dynamics of Forests of the Kologrivsky Forest Reserve] / N.N. Dubenok, P.V. CHernyavin, A.V. Lebedev [et al.] // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Bulletin of the Volga State University of Technology. Ser.: For. Ecology. Environmental Management]. — 2016. — № 3 (31). — P. 5–18 [in Russian].

6. Lupyan E. A. «Dni kosmicheskoj nauki – 2010» distancionnoe zondirovanie Zemli ["Space Science Day – 2010" Remote Sensing of the Earth] / E. A Lupyan., O. YU. Lavrova, S. A. Bartalev [et al.] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. — 2010. — V. 7. — № 4. — P. 319–328 [in Russian].

7. Albarakat R. Comparison of Normalized Difference Vegetation Index Derived from Landsat, MODIS, and AVHRR for the Mesopotamian Marshes between 2002 and 2018 / R. Albarakat, V. Lakshmi // Remote Sensing. — 2019. — Vol. 11. — ID 1245. — 16 p. — DOI: 10.3390/rs11101245.

8. Aleksanin A.I. Vliyanie uslovij nablyudeniya na tochnost' raschyota vegetacionnogo indeksa rastitel'nosti NDVI po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli [The Influence of Observation Conditions on the Accuracy of Calculating the Vegetation Index NDVI According to Remote Sensing Data] / A.I. Aleksanin, A.N. Timofeev // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. — 2023. — V. 20. — №1. — P. 133–143. — DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-133-143 [in Russian]

9. Est' li otechestvennye analogi Sentinel-2 i Landsat? [Are There Any Domestic Analogues of Sentinel-2 i Landsat?] // Ekosistema cifrovyh reshenij dlya sel'skohozyajstvennoj otrasli [Ecosystem of Digital Solutions for the Agricultural Industry]. — URL: https://direct.farm/post/yest-li-otechestvennyye-analogi-sentinel2-i-landsat-21776 (accessed: 27.06.2023) [in Russian].

10. Sidorenkov V.M. Metodicheskie aspekty ocenki zapasa vody v snege na osnove dannyh so sputnika Kanopus-B [Methodological Aspects of Estimating the Water Supply in Snow Based on Data from the Canopus-B Satellite] / V.M. Sidorenkov, D.O. Astapov, YU.S. Achikolova [et al.] // Lesohozyajstvennaya informaciya [Forestry Information]. — 2023. — № 2. — P. 55–65. — DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.04 [in Russian]

11. Oficial'nyj portal Irkutskoj oblasti [The official portal of the Irkutsk region]. — URL: https://irkobl.ru (accessed: 27.06.2023) [in Russian].

12. Oficial'nyj sajt Angarskogo gorodskogo okruga [The official website of the Angarsk city district]. — URL: https://angarsk-adm.ru/ekonomika/ (accessed: 27.06.2023) [in Russian].

13. Pribajkal'e. Gorod Tulun [Baikal region. Tulun City]. — URL: https://www.pribaikal.ru/tulun/tulun-o-gorode.html (accessed: 27.06.2023) [in Russian].

14. Oficial'nyj sajt Administracii gorodskogo okruga Municipal'nogo obrazovaniya «gorod Sayansk» [The official website of the administration of the city district of the municipality "City of Sayansk"]. — URL: https://www.admsayansk.ru (accessed: 27.06.2023) [in Russian].

15. Landsat Science. – Landsat programme site. — URL: http://landsat.gsfc.nasa.gov/ (accessed: 26.06.2023).

16. GIS QGIS 3 – Raschet indeksa NDVI [GIS QGIS 3 – Calculation of the NDVI index]. — URL: https://youtube/LSUzEdx7fkQ (accessed: 27.06.23) [in Russian]

17. Vinokurov M.A. Goroda Irkutskoj oblasti [Cities of the Irkutsk region] / M.A. Vinokurov, A.P. Suhodolov. — Irkutsk: BGUEP Publishing, 2011. — 43 p. [in Russian]

18. Rulev A.S. Analiz sezonnoj dinamiki NDVI estestvennoj rastitel'nosti Zavolzh'ya Volgogradskoj oblasti [Analysis of the Seasonal Dynamics of NDVI Natural Vegetation of the Volga Region of the Volgograd Region] / A.S. Rulev, S.N. Kanishchev, S.S. SHinkarenko // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. — 2016. — V. 13. — № 4. — P. 113–123. — DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-113-123 [in Russian]