

Научная статья
УДК 504.064, 528.88
DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-16-26

Проведение мониторинга поверхностного покрова территории города Читы по материалам дистанционного зондирования

Максим Анатольевич Босов¹, Юлия Андреевна Кокорина²

^{1,2}Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

¹max_bosov@mail.ru, ²kokor1n4@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию
01.07.2024

Одобрена после
рецензирования 08.08.2024

Принята к публикации
12.08.2024

Ключевые слова:

мониторинг,
поверхностный покров,
город Чита, дистанционное
зондирование Земли,
мультиспектральные
снимки, растительность,
вегетационный индекс,
NDVI, Sentinel-2,
пространственно-
временной анализ

Природные территории, на которых располагаются населённые пункты, подвергаются постоянному антропогенному воздействию, что оказывает негативное влияние на экологическую обстановку. Соответственно, становится актуальным проведение мониторинга поверхностного покрова таких территорий с помощью данных дистанционного зондирования Земли. Объект исследования – территория городского округа «Город Чита». Цель исследования – проведение пространственно-временного анализа изменения значений вегетационного индекса NDVI по космическим снимкам за 2016–2023 гг. в целях выявления природных и искусственно созданных форм поверхностного покрова, описания их количественного и качественного состава в границах городского округа, установления характера динамики изменения полученных значений. Задачи исследования: подготовка и сбор материалов дистанционного зондирования Земли; описание территории и структурных форм поверхностного покрова г. Читы на основе индекса NDVI. Методологию и методы исследования составили методы визуального и автоматизированного дешифрирования мультиспектральных снимков, геоинформационные методы анализа растровых и векторных данных. В процессе исследования использовали архивные мультиспектральные снимки Sentinel-2 за указанный период. Выполнена классификация поверхностных форм покрова изучаемой территории, произведена оценка изменения их площадей за 8-летний период по таким административным районам г. Читы, как Центральный, Ингодинский, Черновский и Железнодорожный. Мониторинг поверхностного покрова урбанизированных территорий с помощью вегетационных индексов, полученных по данным дистанционного зондирования (например, Sentinel-2), позволяет найти актуальные сведения о количественном и качественном состоянии растительности, что, в свою очередь, способствует принятию аргументированных решений в области территориального планирования, градостроительства, в том числе планирования особо охраняемых природных территорий, парков отдыха, скверов в г. Чите.

Original article

Monitoring of the Surface Cover of the Chita Territory Based on Remote Sensing Materials

Maxim A. Bosov¹, Yulia A. Kokorina²

^{1,2}Transbaikal State University, Chita, Russia

¹max_bosov@mail.ru, ²kokor1n4@mail.ru

Information about the article

Received 1 July 2024

Approved after review
8 August 2024

Accepted for publication
12 August 2024

Natural areas where settlements are located are a subject to constant anthropogenic impact, which has a negative impact on the environmental situation. In this regard, it becomes relevant to monitor the surface cover of such territories, using remote sensing data. The object of the study is the territory of the urban district "City of Chita". The purpose is to conduct a spatiotemporal analysis of changes in the values of the NDVI vegetation index from satellite images from 2016 to 2023, to identify natural and artificially created forms of surface cover, describe their quantitative and qualitative composition within the boundaries of the urban district, as well as establish the nature of the dynamics of changes in the obtained values. The research objectives are as follows: preparation and collection of materials for remote sensing of the Earth; description of the territory and structural forms of the surface cover of Chita based on the NDVI index. The following research methodology and me-

Keywords:

monitoring, surface cover, Chita city, remote sensing of the Earth, multispectral images, vegetation, vegetation index, NDVI, Sentinel-2, spatiotemporal analysis

thods are used: methods of visual and automated decryption of multispectral images; geoinformation methods for analyzing raster and vector data. Archival multispectral Sentinel-2 images for the specified period have been used in the research process. A classification of surface cover forms of the studied territory has been carried out, and an assessment of changes in their areas over an 8-year period has been made for the administrative districts of the city (Tsentralny, Ingodinsky, Chernovsky and Zheleznodorozhny). Monitoring the surface cover of urbanized areas, using vegetation indices obtained from remote sensing data (e. g. Sentinel-2) allows to obtain up-to-date information on the quantitative and qualitative state of vegetation. The above mentioned has helped to make reasoned decisions in the field of territorial planning and urban development, including planning of protected areas, recreation parks, and public gardens in Chita.

Введение. Территории населённых пунктов подвергаются активному антропогенному воздействию. Хозяйственная деятельность человека негативно сказывается на природных компонентах и экологической обстановке городских агломераций. Соответственно, появляется необходимость в проведении мониторинга поверхностного покрова городской застройки для недопущения возникновения кризисных, с точки зрения экологии, ситуаций.

Объект исследования – городской округ «Город Чита». Площадь города – 534 км², в состав которого входят 4 административных района: Центральный, Ингодинский, Черновский и Железнодорожный¹. В границах г. Читы на 1 января 2023 г. проживали 333 679 чел.² Территория города представляет собой совокупность сохранившихся природных ландшафтов и активно развивающихся, изменяющихся антропогенных ландшафтов. Первая группа включает естественно сформировавшиеся площади, такие как приречные луга, лесостепные участки, лесной массив высокоствольных деревьев, вторая группа – урбанизированные кварталы и сельскохозяйственные участки, городскую многоэтажную и дачную частную застройку, районы, занятые промышленными предприятиями и техногенными комплексами сооружений, объектами энергетики и транспортной инфраструктуры.

Предмет исследования – значения нормализованного относительного индекса

¹ Об утверждении Генерального плана городского округа «Город Чита»: решение Думы городского округа «Город Чита»: [от 22 декабря 2011 г. № 282]. – Текст: электронный // Официальный сайт правовой информации городского округа «Город Чита». – URL: <https://admin.msuchita.ru/генеральный-план-городского-округа-1> (дата обращения: 07.04.2024).

² Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2023 г. (с учётом итогов Всероссийской переписи населения 2020 г.). – Текст: электронный // Федеральная служба государственной статистики: [офиц. сайт]. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_MO_2023.xlsx (дата обращения: 05.05.2024).

NDVI, который является дистанционным индикатором наличия и уровня развития зелёной фитомассы.

Цель исследования – проведение пространственно-временного анализа изменения значений вегетационного индекса NDVI по космическим снимкам за 2016–2023 гг. в целях выявления природных и искусственно созданных форм поверхностного покрова, описания их количественного и качественного состава в границах городского округа, а также установления характера динамики изменения полученных значений.

Проведение анализа даёт возможность выявить природные и искусственно созданные формы поверхностного покрова, описать их количественный и качественный состав в границах городского округа, а также установить характер динамики изменения полученных значений.

Задачи исследования: подготовка и сбор материалов дистанционного зондирования Земли; описание территории и структурных форм поверхностного покрова г. Читы на основе индекса NDVI.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы визуального и автоматизированного дешифрирования мультиспектральных снимков, геоинформационные методы анализа растровых и векторных данных.

Исходными материалами стали растровые снимки космического спутника Sentinel-2, довольно хорошо зарекомендовавшего себя при проведении мониторинга поверхностного покрова [11; 15; 16]. Данный спутник выбран по ряду преимуществ, таких как высокое пространственное разрешение растровых продуктов, открытый доступ к ним и периодичность съёмки не реже 7 дней³.

³ Sentinel-2 User Handbook. ESA Standard Document. 2015. – URL: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook (дата обращения: 29.05.2024). – Текст: электронный.

В качестве индикатора поверхностного покрова в приведённой работе использован один из самых распространённых вегетационных индексов – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный индекс растительности).

Разработанность темы исследования. В соответствии с методикой определения качества городской среды¹, урбанизированные территории оцениваются по матрице из 36 индикаторов, сформированной на основе оценки 6 типов городских пространств (в том числе и «озеленённые пространства»), каждому из которых присваиваются баллы по 6 критериям (рис. 1).

В группе из 62 крупных городов (250 тыс. чел. – 1 млн чел.) с «условно комфортными условиями климата» в 2023 г. г. Чита занимает 55-е место с результатом 198 баллов (из возможных 360). Города с сумой баллов более 180 (более 50 % максимального значения) признаются «городами с благоприятной городской средой».

Предложенная методика даёт общее представление о территориальном устройстве и поверхностном покрове городской агломерации, без возможности оценки отдельных административных районов, а динамичный рост «зелёного индекса» может отображать количество проводимых мероприятий по озеленению, но не является до-

казательством улучшения экологической ситуации, качественного и количественного прироста зелёной фитомассы.

Использование материалов дистанционного зондирования Земли позволяет более достоверно анализировать результаты экологического мониторинга, а также оптимизировать его осуществление. Эмпирически рассчитанные вегетационные индексы дают более точную информацию о зелёной инфраструктуре города, в том числе о её состоянии. Так, мониторинг поверхностного покрова различных по площади городов и численности населения (от малых до городов-миллионов) как в нашей стране, так и за рубежом с использованием данных дистанционного зондирования отражён в работах [2; 3; 6–10; 14] и др.

При территориальном планировании особое внимание уделяется городскому комфорту, эстетичности, микроклимату, рекреационным зонам, функциональный максимум которых может быть обеспечен за счёт формирования устойчивого водно-зелёного каркаса (рис. 2).

Как отмечено в работе [5], реализация водно-зелёного каркаса позволяет повысить качество городской среды в целом, а также создаёт благоприятный экономический эффект, увеличивая инвестиционную привлекательность города.

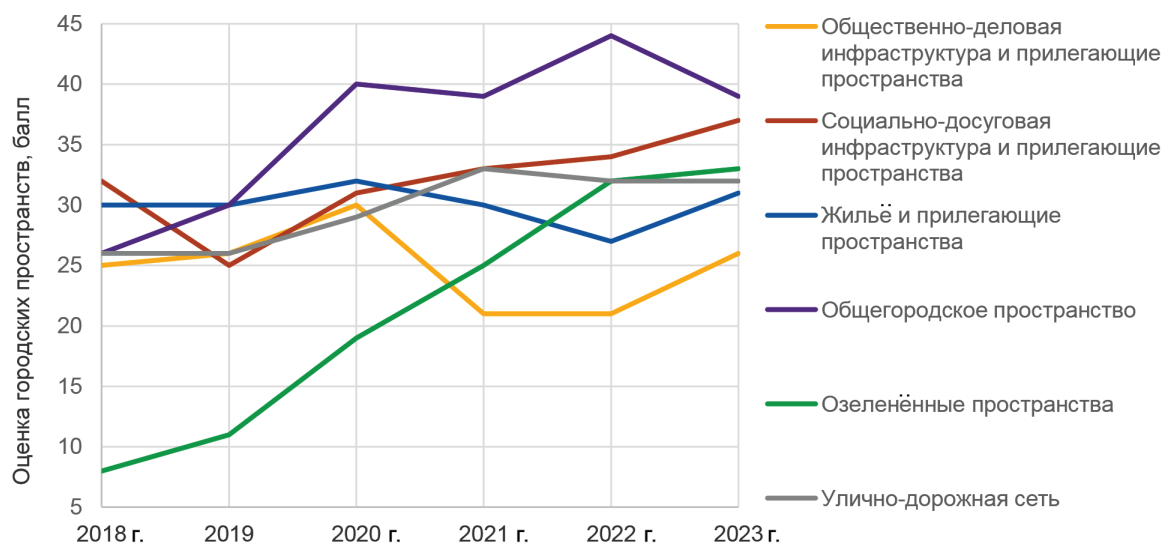


Рис. 1. Количество баллов по 6 типам городских пространств г. Читы / **Fig. 1.** The number of points for 6 types of urban spaces of the city of Chita¹

¹ Индекс качества городской среды в разрезе городов и субъектов Российской Федерации за 2023 г. – Текст: электронный // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации: [официальный сайт]. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/364202> (дата обращения: 18.05.2024).

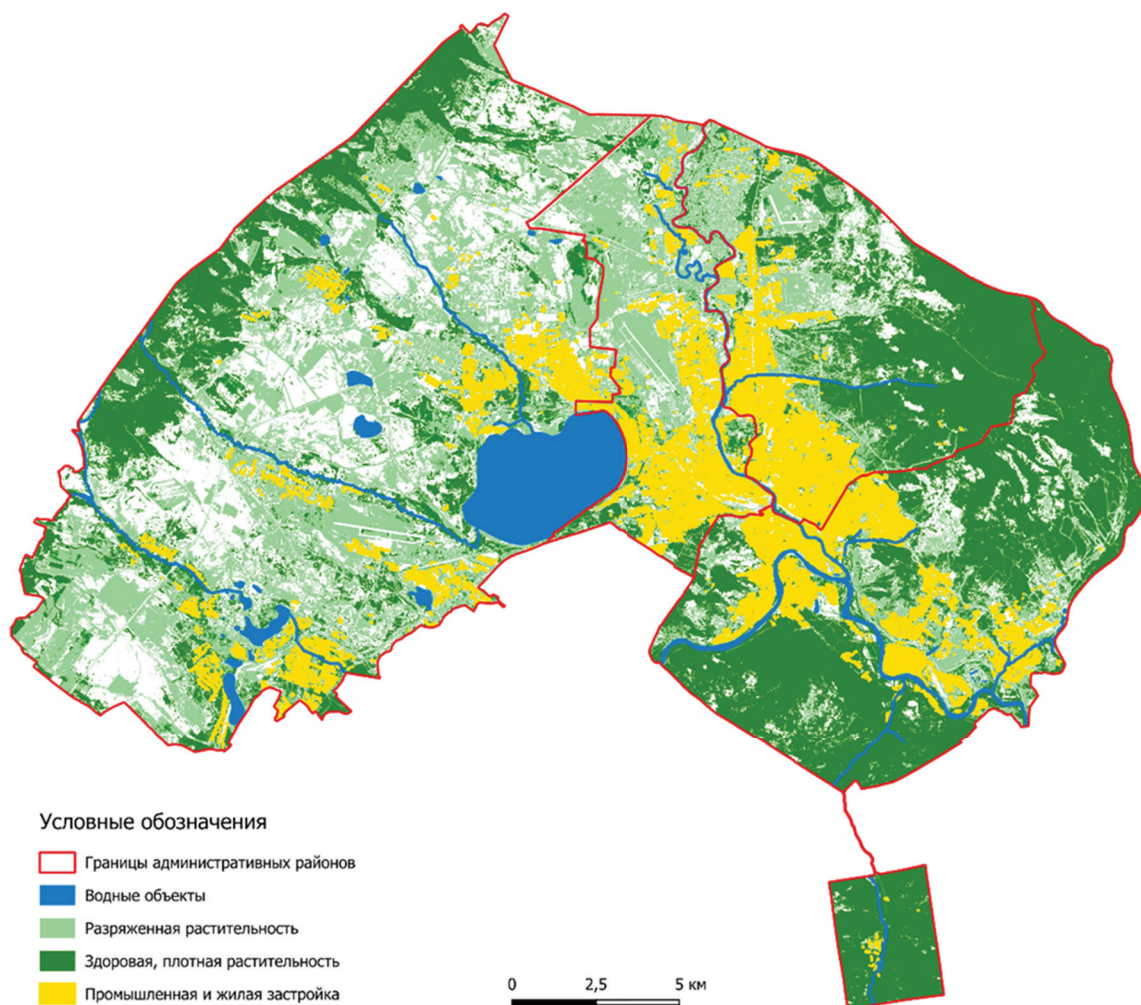


Рис. 2. Водно-зелёный каркас г. Читы / **Fig. 2.** The water-green frame of Chita

Результаты исследования. Мониторинг поверхностного покрова г. Читы выполняли в геоинформационной системе QGIS версии 3.34.3 по архивным снимкам Sentinel-2, которые выгружены при помощи функционально-

го плагина Semi-Automatic Classification Plugin [12]. Одним из главных критериев отбора снимков являлся низкий процент наличия облачности на мультиспектральных изображениях (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Используемые мультиспектральные изображения Sentinel-2 /
The used multispectral images Sentinel-2

Идентификатор снимков / ID of the snapshots	Дата и время съёмки / Date and time of shooting	Облачность, % / Cloudcover, %
L1C_T49UFT_A006164_20160827T033312	2016-08-2703:33:12	0
L1C_T49UFT_A011455_20170901T032536	2017-09-0103:25:36	4,33
L1C_T49UFT_A007623_20180822T032529	2018-08-2203:25:29	6,62
L2A_T49UFT_A012771_20190817T032542	2019-08-1703:25:42	4,62
L2A_T49UFT_A017633_20200722T032538	2020-07-2203:25:38	5,65
L2A_T49UFT_A023396_20210829T034147	2021-08-2903:41:47	0,01
L1C_T49UFT_A028401_20220814T034117	2022-08-1403:41:17	4,25
L1C_T49UFT_A042772_20230831T032653	2023-08-3103:26:53	1,41

Расчёт значений индекса NDVI проводили с помощью встроенного инструмента «Калькулятор растров» путём известной математической комбинации красного и ближнего инфракрасного каналов [17].

Значения индекса NDVI принадлежат диапазону от -1 до 1, где значения ниже 0 указывают на искусственно созданные формы покрова (бетон, асфальт, дорожные покрытия и иные), а также на водные зеркала открытых водных объектов. Значения выше 0 соответствуют естественным формам покрова [7; 13; 16]:

- 1) 0–0,2 – открытая почва;
- 2) 0,2–0,3 – слаборазвитый, скудный, угнетённый растительный покров (травянистая и кустарниковая растительность);
- 3) 0,3–0,6 – средний уровень развития и плотности фитомассы (редкие отдельно произрастающие низкорослые деревья и кустарники);
- 4) 0,6–1 – плотная, здоровая фитомасса (плотные массивы высокоствольных деревьев).

По полученным вегетационным изображениям предоставляется возможность выделения на рассматриваемой территории различных форм поверхностного покрова и осуществления измерений соответствующих площадей. В качестве примера рассчитаны и визуализированы дифференцированные вегетационные данные по территории Железнодорожного административного района г. Читы (рис. 3, табл. 2).

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что в 2023 г. площадь территории, покрытой растительностью, характеризующейся отличным состоянием, составляет 10,49 км², т. е. 19,74 % всей общей площади Железнодорожного района.

Аналогичным образом определены значения вегетационного индекса по территории всего г. Читы, на основании чего для каждого административного района построен график изменения доли площади для каждой формы поверхностного покрова по годам в зависимости от значений индекса NDVI (рис. 4).

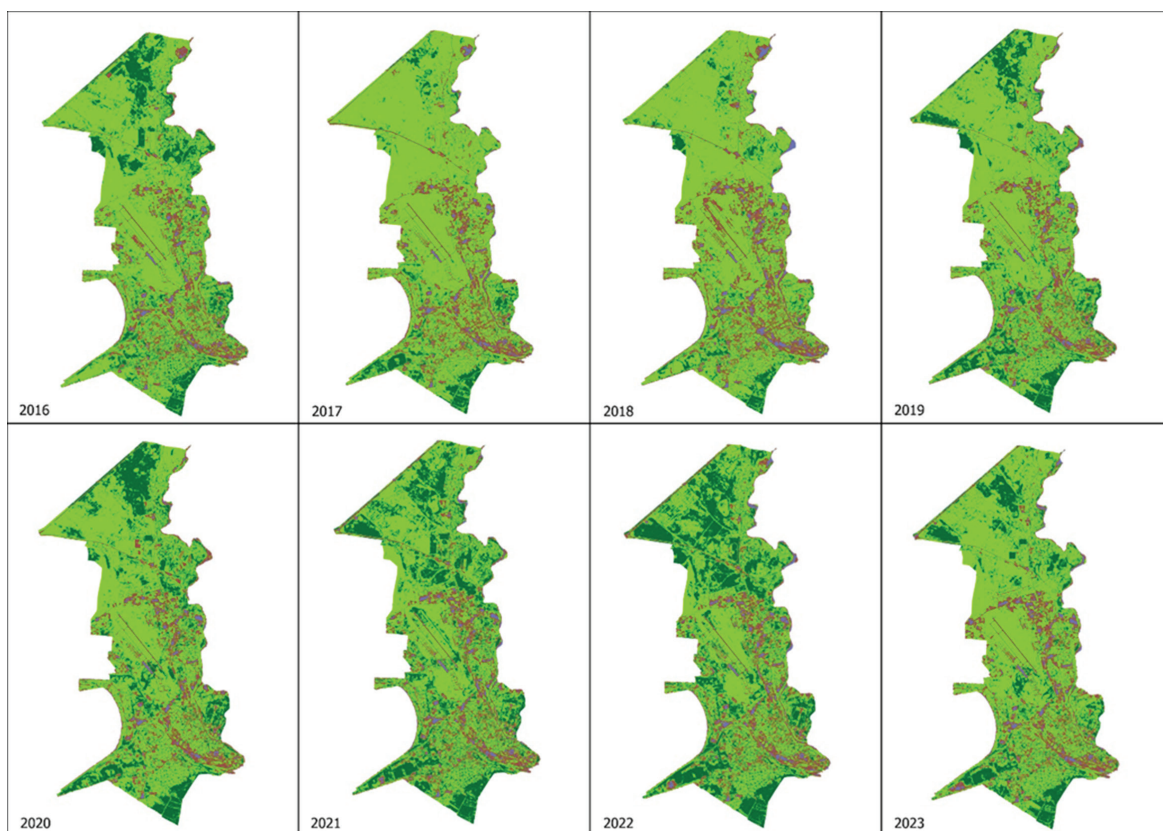


Рис. 3. Графическое представление индексных значений NDVI на примере Железнодорожного района г. Читы за 2016–2023 гг. / **Fig. 3.** Graphical representation of NDVI index values using the example of the Zheleznodorozhny district of Chita in 2016–2023.

Таблица 2 / Table 2

Изменение площадей поверхностного покрова / Changes in areas of surface cover

Значения NDVI / NDVI values		Состояние по NDVI / Status by NDVI	Площадь, км ² / Area, km ²							Цвет / Colour	
			2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.		2023 г.
>0,6	км ² / km ²	отличное / excellent	11,18	5,55	5,02	10,52	13,26	15,73	17,98	10,49	
	%		21,05	10,45	9,46	19,81	24,97	29,61	33,84	19,74	
0,6–0,3	км ² / km ²	хорошее / good	32,27	36,16	34,73	33,03	30,12	27,04	24,69	31,48	
	%		60,74	68,06	65,36	62,18	56,70	50,90	46,47	59,26	
0,3–0,2	км ² / km ²	удовлетворительное / satisfactory	4,38	5,36	5,75	4,45	4,69	4,08	4,22	4,73	
	%		8,24	10,08	10,82	8,38	8,82	7,67	7,94	8,91	
<0,2	км ² / km ²	без растительности / without vegetation	5,30	6,06	7,63	5,12	5,06	6,28	6,24	6,43	
	%		9,98	11,41	14,36	9,64	9,52	11,82	11,75	12,09	

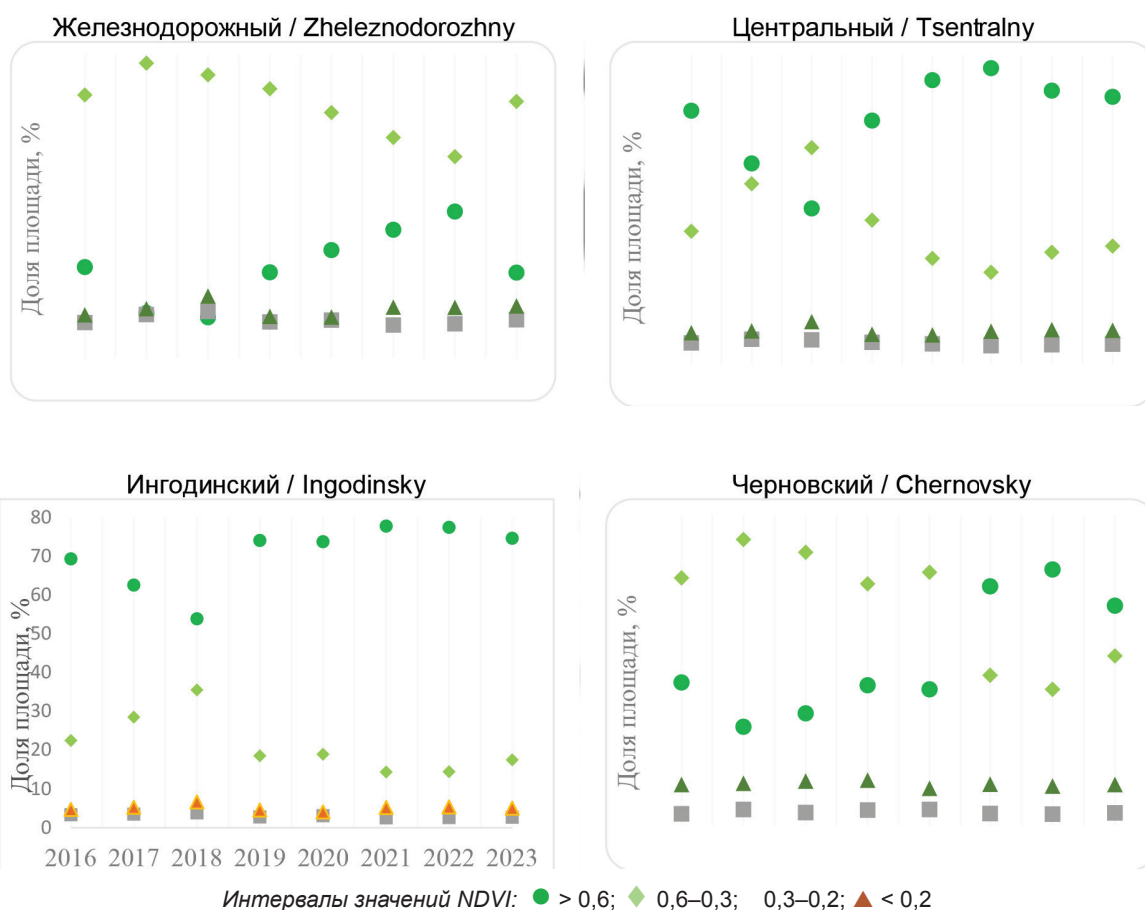


Рис. 4. Доля площади поверхностного покрова с растительностью в отличном, хорошем, удовлетворительном состоянии и без растительности по районам г. Читы в 2016–2023 гг. /

Fig. 4. The share of the surface cover area with vegetation in excellent, good, satisfactory condition and without vegetation by districts of the city of Chita in 2016–2023.

Анализируя графики, можно сделать выводы о количестве площадей поверхностного покрова, выраженных в процентном показателе, для любого административного района. Например, в Ингодинском районе наблюдается преобладание поверхностного покрова с растительностью в отличном состоянии (NDVI более 0,6) на протяжении всего рассматриваемого временного периода, однако в 2018 г. отмечалось уменьшение доли такого покрова почти на 10 % в сравнении с предшествующим годом, тогда как в 2019 г. наблюдалось увеличение на 20 %. Доля территории, покрытой растительным покровом в хоро-

шем состоянии (NDVI в интервале 0,3–0,6), практически симметрична доле территории с растительностью в отличном состоянии. В 2018 г. наблюдается максимальное значение доли площади, которое зафиксировано, судя по всему, по причине «перехода» одного состояния растительности в другое.

Суммарные значения площадей каждой формы поверхностного покрова (выделенных по категориям значений NDVI) для всех административных районов г. Читы указаны в табл. 3. Дополнительно показаны тренды изменения показателя NDVI для каждого года относительно предыдущего.

Таблица 3 / Table 3

Площадь идентифицируемой растительности / The area of the identified vegetation

Район / District	Площадь, км ² / Area, km ²							
	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
<i>NDVI менее 0,2 (без растительности) / NDVI less than 0,2 (without vegetation)</i>								
Центральный / Tsentralny	6,09	6,45↑	8,20↑	5,77↓	5,68↓	6,38↑	6,69↑	6,56↓
Ингодинский / Ingodinsky	6,35	7,09↑	8,92↑	6,09↓	5,43↓	6,95↑	7,18↑	6,77↓
Черновский / Chernovsky	24,50	25,23↑	26,60↑	27,15↑	22,30↓	24,81↑	23,66↓	24,56↑
Железнодорожный / Zheleznodorozhny	5,30	6,06↑	7,63↑	5,12↓	5,06↓	6,28↑	6,24↓	6,43↑
<i>NDVI в интервале 0,2–0,3 (удовлетворительное состояние) / NDVI in the range of 0,2–0,3 (satisfactory condition)</i>								
Центральный / Tsentralny	4,17	4,87↑	4,74↓	4,29↓	4,00↓	3,63↓	3,80↑	3,93↑
Ингодинский / Ingodinsky	4,47	4,67↑	5,07↑	3,68↓	4,20↑	3,43↓	3,49↑	3,65↑
Черновский / Chernovsky	7,00	9,66↑	7,90↓	9,35↑	9,74↑	7,21↓	6,82↓	7,64↑
Железнодорожный / Zheleznodorozhny	4,38	5,36↑	5,75↑	4,45↓	4,69↑	4,08↓	4,22↑	4,73↑
<i>NDVI в интервале 0,3–0,6 (хорошее состояние) / NDVI in the range of 0,3–0,6 (good condition)</i>								
Центральный / Tsentralny	25,26	34,20↑	41,06↑	27,33↓	20,11↓	17,52↓	21,29↑	22,44↑
Ингодинский / Ingodinsky	29,96	38,08↑	47,39↑	24,72↓	25,30↑	19,14↓	19,32↑	23,29↑
Черновский / Chernovsky	147,78	170,81↑	163,12↓	144,30↓	151,26↑	89,80↓	81,34↓	101,20↑
Железнодорожный / Zheleznodorozhny	32,27	36,16↑	34,73↓	33,03↓	30,12↓	27,04↓	24,69↓	31,48↑
<i>NDVI более 0,6 (отличное состояние) / NDVI over 0,6 (excellent condition)</i>								
Центральный / Tsentralny	48,06	38,06↓	29,59↓	46,19↑	53,80↑	56,06↑	51,80↓	50,65↓
Ингодинский / Ingodinsky	92,44	83,38↓	71,84↓	98,73↑	98,28↓	103,70↑	103,22↓	99,50↓
Черновский / Chernovsky	85,39	58,97↓	67,05↑	83,87↑	81,37↓	142,85↑	152,84↑	131,26↓
Железнодорожный / Zheleznodorozhny	11,18	5,55↓	5,02↓	10,52↑	13,26↑	15,73↑	17,98↑	10,49↓

Осуществление пространственно-временного анализа поверхностного покрова территории г. Читы за 2016–2023 гг. позволило получить актуальные сведения о качественном и количественном изменении отдельно взятых природных компонентов, оценить использование территориальных ресурсов, а также охарактеризовать экологическое состояние города в целом.

Обсуждение. Анализируя вегетационные значения, сведенные в табл. 3, можно сделать следующие выводы:

1) за рассматриваемый период в каждом административном районе наблюдается увеличение площади с поверхностным покровом без растительности (значения NDVI до 0,2). Доля такого покрова не превышает 10 % общей площади каждого района;

2) доля поверхностного покрова с растительностью в удовлетворительном состоянии (NDVI в интервале 0,2–0,3) является минимальной для каждого района. При этом в Центральном и Ингодинском районах отмечается сокращение такого покрова, тогда как в Черновском и Железнодорожном – увеличение;

3) в каждом административном районе наблюдается сокращение площади поверхностного покрова с растительностью в хорошем состоянии (значения NDVI в интервале 0,3–0,6). В Черновском и Железнодорожном районах площадь такого покрова превосходит иные формы покрова и составляет 55,84 и 60,74 % всей площади соответственно;

4) тенденция к повышению площади растительности в отличном состоянии (значения NDVI более 0,6) наблюдается во всех районах, за исключением Железнодорожного. Наиболее значительное увеличение площади произошло в границах Черновского района: прирост на 2023 г. составил 45,87 км². В долевым выражении этот покров преобладает над другими формами покрова в Центральном и Ингодинском районах.

В результате проведения мониторинга поверхностного покрова административных районов городского округа «Город Чита» по космическим снимкам Sentinel-2 и значениям вегетационного индекса NDVI установлено, что Ингодинский район является самым «экологически» здоровым и устойчивым по причине наибольшего озеленения и положительной динамики развития зелёной фитомассы за исследуемый период времени, что связано с малой долей застроенной территории райо-

на, составляющей около 20 % всей площади Ингодинского района [1].

Железнодорожный район является самым густонаселённым, урбанизированным, где площадь территории с растительностью в хорошем состоянии в 3 раза больше площади, покрытой растительностью в отличном состоянии.

Заключение. В проведённом исследовании рассмотрена возможность применения индекса NDVI для осуществления пространственного мониторинга застроенных территорий, что позволит локально и масштабно исследовать происходящие в природе процессы, например такие как ухудшение состояния растительности, которое нельзя констатировать на обычных фотоснимках и непосильно оценить при проведении полевых работ.

Административные районы, входящие в состав городского округа, имеют неоднородный поверхностный покров в связи с разрозненным расселением людей и неравномерным вовлечением земель в оборот, что обусловлено сложной формой рельефа, гидрографическими особенностями местности, пестротой почвенного покрова и т. д.

В результате проведенного мониторинга поверхностного покрова г. Читы с использованием материалов дистанционного зондирования Земли можно сделать вывод о том, что территория городского округа «Город Чита» состоит из совокупности площадей естественного, природного покрова и площадей видоизменённого от антропогенного воздействия покрова. Экологически устойчивым районом, самым озеленённым, со стабильными показателями числовых значений индекса NDVI всех форм покрова, следует считать Ингодинский. Наиболее пристальному вниманию для недопущения экологических проблем и, как следствие, ухудшения качества жизни, комфорта и здоровья граждан требует Железнодорожный район.

В дальнейшей работе для получения сведений о наибольшей достоверности предполагаются комплексное применение различных вегетационных индексов и детализация интересующих объектов, поверхностей с помощью беспилотных летательных аппаратов [4], наземных методов, в том числе с использованием камер с узкополосными фильтрами для более точного разделения красного и ближнего инфракрасного каналов [18].

Список литературы

1. Босов М. А., Кокорина Ю. А. Использование методов дистанционного зондирования при оценке экологической безопасности на примере Ингодинского района г. Читы // Безопасность-2023: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита: ЗабГУ, 2023. С. 48–53.
2. Капитонова Т. А., Крупнова Т. Г., Тихонова С. А., Стручкова Г. П., Ракова О. В. Оценка обеспеченности зелёными насаждениями городской промышленной зоны Челябинска с использованием изображений Landsat // Вестник Воронежского государственного университета. Серия «География. Геоэкология». 2023. № 1. С. 93–102.
3. Каширина Е. В., Новиков А. А., Голубева Е. И., Новикова А. М. Оценка уровня озеленения г. Севастополя по данным дистанционного зондирования Земли // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 2. С. 108–116.
4. Кокорина Ю. А. Оценка значений индекса NDVI на территории города Читы по данным Sentinel-2 // Молодёжная научная весна: материалы Л Науч.-практ. конф. молодых исследователей ЗабГУ. Чита: ЗабГУ, 2023. С. 172–174.
5. Липина С. А., Старцева О. П. Новые возможности финансирования проектов устойчивого развития городов России // Вопросы инновационной экономики. 2021. Т. 11, № 4. С. 1755–1772.
6. Рунова Е. М., Степанова О. А. Анализ динамики вегетационного индекса зелёных насаждений городов Иркутской области в период вегетационной активности. Текст: электронный // Journal of Agriculture and Environment. 2024. № 1. URL: <https://jae.cifra.science/archive/1-41-2024-january/10.23649/JAE.2024.41.11> (дата обращения: 20.06.2024).
7. Скачкова М. Е., Гурьева О. С. Мониторинг состояния зелёных насаждений Санкт-Петербурга по материалам дистанционного зондирования // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 5. С. 51–57.
8. Фетисов Д. М., Жучков Д. В., Горюхин М. В. Оценка уровня озеленения города Биробиджана с применением мультиспектральных данных // Биосфера. 2021. Т. 13, № 4. С. 170–179.
9. Хужахметова А. Ш., Воронина В. П., Лазарев С. Е. Оценка пространственной структуры древесно-кустарниковых насаждений города Волгограда по данным мультиспектральных космических снимков // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 3. С. 218–232.
10. Шабайкина В. А., Ларина А. В., Саулин В. А. Оценка состояния системы озеленения г. Рузаевка с использованием многозональных космических снимков // Вектор ГеоНаук. 2020. Т. 3, № 3. С. 96–105.
11. Boori M. S., Choudhary K., Kupriyanov A. V. Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series // Computer Optics. 2020. Vol. 44, no. 3. P. 409–419.
12. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation // Journal of Open Source Software. 2024. No. 8.1.3.1. P. 188–194.
13. Huang Sh., Tang L., Hupy J. P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing // Journal of Forestry Research. 2020. No. 32.
14. Martin G. K., O'Dell K., Kinney P., Pescador-Jimenez M., Rojas-Rueda D., Canales R. A., Anenberg S. Tracking progress toward urban nature targets using landcover and vegetation indices: A global study for the 96 c40 cities // GeoHealth. 2024.
15. Misra G., Cawkwell F., Wingler A. Status of Phenological Research Using Sentinel-2 Data: A Review // Remote Sensing. 2020. No. 12.
16. Moreno R., Ojeda N., Azocar J., Venegas C., Inostroza L. Application of NDVI for identify potentiality of the urban forest for the design of a green corridors system in intermediary cities of Latin America: case study, Temuco, Chile // Urban Forestry & Urban Greening. 2020. Vol. 55.
17. Nowak B. Creating NDVI maps from Sentinel 2 multispectral aerial images // ResearchGate. 2020.
18. Zhao Q., Qu Y. The Retrieval of Ground NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Data Consistent with Remote-Sensing Observations // Remote Sensing. 2024. No. 16.

References

1. Bosov M. A., Kokorina Yu. A. The use of remote sensing methods in assessing environmental safety on the example of the Ingodinsky district of Chita. Safety-2023: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Chita: ZabGU, 2023. P. 48–53. (In Rus.)
2. Kapitonova T. A., Krupnova T. G., Tikhonova S. A., Struchkova G. P., Rakova O. V. Assessment of the provision of green spaces in the urban industrial zone of Chelyabinsk using Landsat images. Bulletin of the Voronezh State University. The series "Geography. Geoecology", no. 1, pp. 93–102, 2023. (In Rus.)
3. Kashirina E. V., Novikov A. A., Golubeva E. I., Novikova A. M. Assessment of the greening level of Sevastopol according to remote sensing data. Environmental Control Systems, no. 2, pp. 108–116, 2020. (In Rus.)

4. Kokorina Yu. A. Assessment of the NDVI index values on the territory of the city of Chita according to Sentinel-2. Youth scientific spring: materials of the L Scientific and Practical Conference of young researchers of ZabGU. Chita: ZabGU, 2023. P. 172–174. (In Rus.)
5. Lipina S. A., Startseva O. P. New financing opportunities for sustainable urban development projects in Russia. *Issues of Innovative Economics*, vol. 11, no. 4, pp. 1755–1772, 2021. (In Rus.)
6. Runova E. M., Stepanova O. A. Analysis of the dynamics of the vegetation index of green spaces in cities of the Irkutsk region during the period of vegetation activity. *Journal of Agriculture and Environment*, no. 1, 2024. Web. 20.06.2024. <https://jae.cifra.science/archive/1-41-2024-january/10.23649/JAE.2024.41.11>. (In Rus.)
7. Skachkova M. E., Guryeva O. S. Monitoring of the state of green spaces in St. Petersburg based on remote sensing materials. *Ecology and Industry of Russia*, vol. 27, no. 5, pp. 51–57, 2023. (In Rus.)
8. Fetisov D. M., Zhuchkov D. V., Goryukhin M. V. Assessment of the greening level of the city of Birobidzhan using multispectral data. *Biosphere*, vol. 13, no. 4, pp. 170–179, 2021. (In Rus.)
9. Khuzhakhmetova A. Sh., Voronina V. P., Lazarev S. E. Assessment of the spatial structure of tree and shrub plantations of the city of Volgograd according to multispectral satellite images. *Izvestiya Nizhnevolszhskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Professional Education*, no. 3, pp. 218–232, 2022. (In Rus.)
10. Shabaikina V. A., Larina A. V., Saulin V. A. Assessment of the state of the landscaping system in Ruzaevka using multi-zone satellite images. *Vector Geosciences*, vol. 3, no. 3, pp. 96–105, 2020. (In Rus.)
11. Boori M. S., Choudhary K., Kupriyanov A. V. Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series. *Computer Optics*, vol. 44, no. 3, pp. 409–419, 2020. (In Eng.)
12. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. *Journal of Open Source Software*, no. 8.1.3.1, pp. 188–194, 2024. (In Eng.)
13. Huang Sh., Tang L., Hupy J. P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, no. 32, 2020. (In Eng.)
14. Martin G. K., O'Dell K., Kinney P., Pescador-Jimenez M., Rojas-Rueda D., Canales R. A., Anenberg S. Tracking progress toward urban nature targets using landcover and vegetation indices: A global study for the 96 c40 cities. *GeoHealth*, 2024. (In Eng.)
15. Misra G., Cawkwell F., Wingler A. Status of Phenological Research Using Sentinel-2 Data: A Review. *Remote Sensing*, no. 12, 2020. (In Eng.)
16. Moreno R., Ojeda N., Azocar J., Venegas C., Inostroza L. Application of NDVI for identify potentiality of the urban forest for the design of a green corridors system in intermediary cities of Latin America: case study, Temuco, Chile. *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 55, 2020. (In Eng.)
17. Nowak B. Creating NDVI maps from Sentinel 2 multispectral aerial images. *ResearchGate*, 2020. (In Eng.)
18. Zhao Q., Qu Y. The Retrieval of Ground NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Data Consistent with Remote-Sensing Observations. *Remote Sensing*, no. 16, 2024. (In Eng.)

Информация об авторах

Босов Максим Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой инженерной экологии, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; max_bosov@mail.ru. Область научных интересов: экоурбанистика, дистанционное зондирование Земли, гидротехника.

Кокорина Юлия Андреевна, магистр, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; kokor1n4@mail.ru. Область научных интересов: экоурбанистика, дистанционное зондирование Земли.

Information about the authors

Bosov Maxim A., candidate of technical sciences, associate professor, head of Department of Environmental Engineering, Transbaikal State University, Chita, Russia; max_bosov@mail.ru. Research interests: eco-urbanism, remote sensing of the Earth, hydraulic engineering.

Kokorina Yulia A., master's degree student, Transbaikal State University, Chita, Russia; kokor1n4@mail.ru. Research interests: eco-urbanism, remote sensing of the Earth.

Вклад авторов в статью

Босов М. А. – разработка идеи исследования, анализ разработанности темы, анализ полученных результатов, формулировка выводов, подбор библиографии, написание текста.

Кокорина Ю. А. – сбор и формирование архива данных дистанционного зондирования Земли, вычисление вегетационного индекса NDVI, пространственно-временной анализ поверхностного покрова территории г. Чита за 2016–2023 гг., подбор библиографии, написание текста.

Authors' contribution to the article

Bosov M. A. – development of the research idea, analysis of the topic's development, analysis of the results, formulation of conclusions, selection of bibliography, writing of the text.

Kokorina Yu. A. – collection and formation of the archive of Earth remote sensing data, calculation of the vegetation index NDVI, spatio-temporal analysis of the surface cover of the territory of the city of Chita for the period from 2016 to 2023, selection of bibliography, writing of the text.

Для цитирования

Босов М. А., Кокорина Ю. А. Проведение мониторинга поверхностного покрова территории города Читы по материалам дистанционного зондирования // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 3. С. 16–26. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-16-26.

For citation

Bosov M. A., Kokorina Yu. A. Monitoring of the Surface Cover of the Chita Territory Based on Remote Sensing Materials // Transbaikalian State University Journal. 2024. Vol. 30, no. 3. P. 16–26. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-16-26.

Научная статья
УДК 502/ 504; 528.88
DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-27-37

Геоэкологическое картирование селитебных территорий Забайкальского края с использованием свёрточной нейронной сети

Денис Владимирович Кочев

Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия
denis.ko4ev@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию
28.06.2024

Одобрена после
рецензирования 19.07.2024

Принята к публикации
06.08.2024

Ключевые слова:

паводкоопасные территории, наводнения, дешифрирование, дистанционное зондирование Земли, нейронные сети, машинное обучение, программа для электронной вычислительной машины, Python, ущерб, картирование

Наводнения представляют серьёзную угрозу для экономики и населения, однако их опасность зачастую недооценивается. В результате этого потенциально опасные участки хозяйственных территорий подвергаются интенсивной застройке, что приводит к ущербу при их затоплении. Использование современных методов дистанционного зондирования Земли в сочетании с алгоритмами глубокого обучения позволяет значительно повысить эффективность и точность картирования данных территорий, а также предоставляет возможность эффективно ими управлять, оптимизируя процессы планирования и развития территорий, снижая ущерб при затоплении. Объект исследования – паводкоопасные территории населённых пунктов Забайкальского края. Цель исследования – усовершенствование геоэкологического картирования хозяйственного использования селитебных территорий Забайкальского края, подверженных наводнениям, в межпаводковый период. Задачи исследования: обработка снимков; визуализация объектов, принадлежащих к разным классам хозяйственного использования; анализ и оценка изменений в пределах опасных территорий; проверка результатов, полученных с использованием свёрточной нейронной сети; разработка программного продукта, позволяющего информировать заинтересованных лиц о наличии опасных территорий. В работе использованы методы исследований в области дистанционного зондирования Земли и обработки картографической информации. Получены данные дистанционного зондирования высокого разрешения, свободно распространяемые сервисами Google Earth, и данные с беспилотных летательных аппаратов. Данные представлены в растровом формате и имеют координатную привязку. Обработку данных осуществляли с помощью свёрточной нейронной сети U-Net. Выполнены обработка снимков с использованием нейросети и визуализация объектов, принадлежащих к разным классам хозяйственного использования территорий. Произведены ретроспективный анализ и оценка изменений застройки в опасных территориях. Данные показывают активное индивидуальное строительство в опасной зоне. Осуществлена проверка адекватности результатов, полученных с использованием свёрточной нейронной сети. Разработан программный продукт, позволяющий определить наличие опасных территорий в пределах населённых пунктов, что позволяет значительно повысить эффективность и точность картирования хозяйственной деятельности в населённых пунктах.

Благодарности: исследование проведено при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, грант № 17803ГУ/2022.

Original article

Geocological Mapping of Urbanized Territories of the Transbaikal Territory Using a Convolutional Neural Network

Denis V. Kochev

Transbaikal State University, Chita, Russia
denis.ko4ev@yandex.ru

Information about the article

Received 28 June 2024

Approved after review
19 July 2024

Accepted for publication
6 August 2024

Floods pose a serious threat to economies and communities, but their danger is often underestimated. As a result, potentially dangerous areas of economic territories are subject to intensive development, which leads to damage when they are flooded. The use of modern methods of remote sensing of the Earth in combination with deep learning algorithms can significantly increase the efficiency and accuracy of mapping these territories and makes it possible to effectively manage them, optimizing the pro-

cesses of planning and development of territories, reducing damage due to flooding. The object of the study is flood-prone areas of settlements in the Transbaikalian Territory. The goal of the study is to improve geoeological mapping of the economic use of residential areas of the Transbaikalian Territory that are prone to floods during the inter-flood period. The research objectives are as follows: image processing; visualization of objects belonging to different classes of economic use; analysis and assessment of changes within hazardous areas; checking the results obtained using a convolutional neural network; development of a software product that allows you to inform interested parties about the presence of dangerous territories. The methodology and methods are presented by research methods in the field of remote sensing of the Earth and processing of cartographic information. High-resolution remote sensing data, freely distributed by Google Earth services, and data from UAVs were obtained. The data is given in raster format and has a coordinate reference. Data processing has been carried out using the U-Net convolutional neural network and image processing by using a neural network and visualization of objects belonging to different classes of economic use of territories. A retrospective analysis and assessment of development changes in hazardous areas has also been performed. The data obtained show active individual construction in the danger zone. The adequacy of the results obtained using a convolutional neural network was checked. A software product has been developed to determine the presence of hazardous areas within populated areas, which can significantly increase the efficiency and accuracy of mapping economic activities in populated areas.

Keywords:

flood-prone areas, floods, decryption, remote sensing of the Earth, neural networks, machine learning, computer program, Python, damage, mapping

Acknowledgement: *the study was conducted with the financial support of the Foundation for the Promotion of Small Enterprises in the Scientific and Technical field, grant No. 17803GU/2022*

Введение. Территория Забайкальского края по своим природным условиям классифицируется как паводкоопасный регион, что подтверждается данными Водной стратегии Российской Федерации. Сложные географические условия Забайкальского края обуславливают активное использование речных долин для проживания населения, ведения сельскохозяйственного и промышленного производства, а также для создания транспортных коммуникаций [7]. В поймах р. Ингода, Чита, Онон, Шилка, Аргунь расположена значительная часть городов и сёл региона. Следовательно, во время наводнений под угрозой затопления оказывается не менее 130 населённых пунктов [6]. Процесс картирования затруднителен из-за временных и трудовых затрат для человека. Глубокое обучение, благодаря своим возможностям в области мультисенсорной и разновременной классификации, становится центральным методом в решении проблем картирования по данным дистанционного зондирования [13].

Объект исследования – паводкоопасные территории населённых пунктов Забайкальского края.

Предмет исследования – геоэкологическое картирование территорий населённых пунктов с помощью свёрточной нейронной сети.

Цель исследования – усовершенствование геоэкологического картирования хозяйственного использования селитебных тер-

риторий Забайкальского края, подверженных наводнениям, в межпаводковый период.

Задачи исследования: обработка снимков с использованием свёрточной нейронной сети; визуализация объектов, принадлежащих к разным классам хозяйственного использования территорий; анализ и оценка изменений в пределах опасных территорий; проверка адекватности результатов, полученных с использованием свёрточной нейронной сети; разработка программного продукта, позволяющего информировать заинтересованных лиц о наличии опасных территорий в пределах крупных населённых пунктов.

Материалы и методы исследования. Наблюдение за уровнем хозяйственного освоения территорий, подверженных паводкам, позволит эффективно управлять их использованием, способствовать восстановлению, обеспечивать безопасное планирование и развитие их экономического потенциала, а также предоставит возможность оценить возможные убытки для застройки и других значимых объектов экономики, вызванные паводками и неблагоприятными гидрометеорологическими явлениями. Использован комплексный подход, включающий методы исследований в области дистанционного зондирования Земли и обработки картографической информации. Получены данные дистанционного зондирования высокого разрешения Махаг, Digital Globe, Ikonos, свободно распространяемые сервисами Google Earth. Для анализа использованы сведения беспилотных лета-

тельных аппаратов (далее – БПЛА). Данные представлены в растровом формате GeoTiff и имеют координатную привязку на системе WGS-84. Обработку данных осуществляли с помощью свёрточной нейронной сети U-Net, с энкодером SE-ResNeXt50.

Разработанность темы исследования. Согласно актуальным научным данным, наблюдается значительное увеличение рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и размера ущербов от опасных природных явлений гидрометеорологического характера в связи с застройкой опасных территорий. Оперативный мониторинг данных зон возможен благодаря использованию данных дистанционного зондирования Земли. Тем не менее существуют значительные проблемы в анализе этих данных, ввиду их большого объёма и длительной, трудоёмкой, рутинной обработки [4]. Введение методов оперативного мониторинга и анализа данных дистанционного зондирования даёт возможность более эффективно управлять этими зонами, минимизируя ущерб и оптимизируя процессы планирования и развития территорий [12].

Благодаря использованию алгоритмов искусственного интеллекта, в частности технологий глубокого обучения свёрточных нейронных сетей, появляется возможность точной классификации и извлечения структуры исследуемых объектов. Это приближает данный тип анализа к визуальному дешифрированию, что является неоспоримым преимуществом по сравнению с традиционными методами автоматического дешифрирования исследуемых объектов [5].

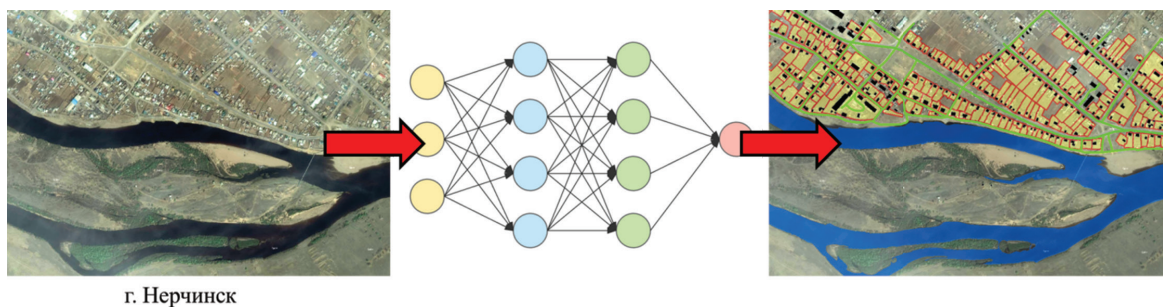
В работе проведена оценка динамики застройки и хозяйственного освоения паводкоопасных территорий на основе разновременных космических снимков, что позволяет выявить тенденции и изменения за определённые промежутки времени. Адекватность и точность результатов проверяли с использованием метрик оценки качества моделей классификации, таких как матрица ошибок (Confusion matrix) и F-мера, что подтверждает достоверность и надёжность полученных данных.

Результаты исследования и их об-суждение. В настоящее время применение алгоритмов искусственного интеллекта является наиболее распространённой технологией в распознавании различной информации на растровых изображениях. Свёрточные нейросети эффективнее также в задачах анализа больших данных со множеством

признаков и сложной структурой различных математических моделей. Свёрточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks – CNN) [1; 2], глубокие сети доверия (Deep Belief Networks – DBN) [12] и рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks – RNN) [10] активно применяются для распознавания речи, компьютерного зрения и обработки естественного языка. Существенный прогресс достигнут в области масштабного распознавания изображений [14; 15; 11], обнаружения объектов [1; 8] и семантической сегментации, главным образом благодаря использованию нейронных сетей. Эффективность применяемых алгоритмов подтверждена работами, включающими классификации различных типов покрытия поверхности Земли, такие как здания и дороги, на основе данных оптического и радиолокационного зондирования [9], что способствовало решению широкого спектра задач дистанционного зондирования [13]. Ранее изложенное позволяет сделать вывод о высокой эффективности и результативности работы нейросетей с растровыми данными, что, в свою очередь, позволяет оценить количественные и качественные показатели застройки в пределах не только опасных зон, но и границ населённых пунктов (рис. 1).

Оценить динамику застраиваемости и хозяйственного освоения территорий можно по двум и более разновременным изображениям, однако «на глаз» качественно и количественно это сделать довольно затруднительно (рис. 2).

Для анализа и оценки изменений на изображениях применяют процесс их дешифрирования. Широко распространено визуальное дешифрирование. Для визуального дешифрирования используется геоинформационная система (например, ArcGIS или QGIS). Визуальное дешифрирование отличается от автоматических методов высокой точностью, однако имеются существенные недостатки с низкой скоростью дешифрирования. Ручная разметка объектов является трудозатратной задачей [3]. Соответственно, разработка и оптимизация свёрточной нейронной сети на архитектуре U-Net являются решением данной задачи благодаря автоматизации процесса дешифрирования. Человек получает дополнительное время для других задач. Ему остаётся только проверить и скорректировать полученный результат, что экономит время и трудовые ресурсы.



г. Нерчинск

Рис. 1. Свёрточная нейронная сеть, которая позволяет выделить и классифицировать различные объекты / **Fig. 1.** Convolutional neural network allows you to identify and classify various objects



Рис. 2. Динамика застройки с. Улёты Забайкальского края за 18-летний период / **Fig. 2.** The development dynamics of the village Uley in the Transbaikalian Territory over an 18-year period

После завершения конфигурации и обучения нейросети подготовлены космоснимки, снимки с БПЛА в различных пространственных разрешениях, которые отправлены на обработку нейросетью. Используются данные полевых исследований с применением БПЛА, а также свободно распространяемые изображения с SASPlanet и GoogleEarthPro. Для анализа отобраны спутниковые снимки пгт Агинское за 2013, 2019 гг. В результате работы нейросети получены растровые изображения с выделенными объектами застройки и объектами хозяйственной деятельности. В

качестве опасной зоны наложен векторный слой зоны с особыми условиями использования территорий (далее – ЗОУИТ) с публичной кадастровой карты. Данная зона практически совпадает с зоной затопления 1 %-й вероятности (рис. 3).

Для сопоставления данных и оценки динамики освоения территорий и прироста застройки в пгт Агинское за 2013–2019 гг. проведён геоинформационный анализ в QGIS и ArcGIS 10.0. Для этого полученные после дешифрирования на свёрточной нейросети растровые изображения подвергали вектори-