

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕЛеной ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДА ТЮМЕНИ

Д.В. Жучков¹✉, В.А. Глазунов², А.С. Третьякова³,
Д.М. Фетисов¹, А.В. Хриченков⁴, А.Г. Бурцев⁴

¹ФГБУН «Институт комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКАРП ДВО РАН), Россия, 679016, ЕАО, г. Биробиджан, ул. Шолом-Алейхема, д. 4

²ФГБУН «Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ТюмНЦ СО РАН), Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, д. 86

³ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (БС УрО РАН), Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

⁴Общество с ограниченной ответственностью «Брусника». Специализированный застройщик», Россия, 620026, г. Екатеринбург, ул. Гоголя, д. 18

dmitriy.zhuchkov.2000@mail.ru

На основе результатов расчета нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) проведен анализ современного состояния зеленой инфраструктуры города Тюмени. Создана векторная карта функционального зонирования города, на которой выделено 6 зон: жилая, общественно-деловая, рекреационная, промышленная, специального назначения и сельскохозяйственная. Для всех зон определены уровень озеленения и доля древесных насаждений. Установлено, что значения NDVI 0.2 и более являются граничными для выделения зеленых насаждений города, NDVI 0.75 и более — для древесной растительности. Выявлено, что распределение зеленых насаждений по территории города неравномерное: доля древесных насаждений достигает максимума (50% и выше) в рекреационной зоне, на которой расположены природные и природоподобные ландшафты; в жилой части города этот показатель минимальный. Определено, что 22 % территории г. Тюмени покрыто древесными насаждениями. Для улучшения экологической обстановки и формирования комфортной городской среды рекомендуется проведение работ по расширению озелененных пространств, особенно в районах новой застройки и общественно-деловой зоне города.

Ключевые слова: зеленая инфраструктура, уровень озеленения, доля древесных насаждений, зеленые насаждения, дистанционное зондирование, NDVI, Тюмень

Ссылка для цитирования: Жучков Д.В., Глазунов В.А., Третьякова А.С., Фетисов Д.М., Хриченков А.В., Бурцев А.Г. Современное состояние зеленой инфраструктуры города Тюмени // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 1. С. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2026-1-74-88

Урбанизация — ведущая современная тенденция развития общества, которая проявляется в увеличении городских площадей, сопровождается экологическими проблемами, связанными с преобразованием растительного покрова, разрушением среды обитания живых организмов [1, 2], изменением потоков энергии, локальным повышением температуры [3–6], нарушением водных и углеродных циклов [7–9].

Наиболее эффективным способом смягчения негативных последствий урбанизации является развитие растительного покрова в пределах городской территории. Растения улучшают качество воздуха, очищают его от пыли и загрязняющих веществ, поглощают выбросы диоксида углерода (CO₂), способствуют снижению шума, регулируют температурный режим,

сток ливневых вод [10–15]. Зеленые насаждения оказывают благоприятное воздействие на психологическое и физическое здоровье человека [16–19]. Городскую растительность можно использовать в качестве эффективного инструмента для создания устойчивой и комфортной среды обитания для человека. Наличие развитой зеленой инфраструктуры, к которой относятся имеющиеся и сохраненные природные территории и городское озеленение, вновь созданное и поддерживаемое человеком, обуславливает успешное функционирование городских экосистем. В связи с этим изучению городских зеленых насаждений уделяется огромное внимание [20–29].

В настоящее время для рационального планирования и управления городским озеленением назрела острая необходимость в данных о пространственной структуре городской растительности и ее изменении во времени.

Наиболее полные данные получают с помощью полевых исследований, однако в случае крупных городских масштабов, исключительным источником данных о городском растительном покрове являются геоинформационные системы (ГИС), функционирующие на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [30–36]. В зависимости от цели исследования используются различные индексы, связанные с ДЗЗ. Наиболее простым и информативным является нормализованный относительный индекс растительности — Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [37, 38]. NDVI применяется для идентификации и оценки состояния растительности в городской местности [32–41] и анализа пространственно-временных изменений растительного покрова [30, 42, 43].

Несмотря на огромный интерес к использованию методов ДЗЗ в мире, в России подобные исследования не имеют широкого распространения [31–36].

Цель работы

Цель работы — комплексная оценка современного состояния зеленой инфраструктуры города Тюмени с помощью методов дистанционного зондирования Земли и выявление основных проблем и направлений для ее развития.

Материалы и методы

Описание района работ. Тюмень — административный центр Тюменской области, один из активно развивающихся научных, культурных, образовательных и инвестиционно привлекательных городов России и Западной Сибири. В последние годы город занимает ведущие позиции по объему жилищного строительства. Площадь городского округа Тюмень составляет 698,48 км². По состоянию на 2024 г. в городе проживает 861,1 тыс. жителей [26].

Тюмень располагается в умеренном поясе в пределах юго-западной части Западно-Сибирской равнины, у восточной границы Туринской равнины, высота н. у. м. составляет 50...120 м. Климат континентальный, среднегодовая температура воздуха +0,3 °С, средняя температура января –17,8 °С, июля +17,2 °С. Средняя продолжительность вегетационного периода составляет 120...125 дней. Годовая сумма осадков 457 мм [44].

Ландшафт города равнинный с чередованием холмистых и ровных участков. Гидрографическая сеть представлена р. Турой и ее притоками — Бабарынкой, Ключами, Тюменкой. Относительно широко в черте города рас-

пространены озера, большинство из которых являются старицами р. Туры. Пойма р. Туры протягивается через центральную часть города, достигает ширины от 3 до 4 км. В пойме хорошо выражены надпойменные террасы высотой до 20...30 м и более над урезом воды [45]. Для Тюмени характерна близость грунтовых вод к поверхности почв.

Почвенный покров представлен преимущественно дерново-подзолистыми, серыми лесными, торфяно-болотными, лугово-болотными почвами, выщелоченными черноземами, а также слабоподзоленные песчаные почвы. На пустырях, под постройками и различными объектами городской инфраструктуры почвы в различной степени антропогенно трансформированы [44, 46].

По ботанико-географическому районированию Тюмень расположена в подзоне мелколиственных лесов, или подтайге. Подзона характеризуется преобладанием березовых и осиново-березовых лесов. На территории города широко распространены представители злаково-разнотравной растительности лугов (иногда заболоченных). В южной части города произрастают массивы сосновых лесов, как правило, преобразованные в вследствие антропогенной деятельности. В пойме р. Туры, которая часто подвергается паводкам, в основном представлена травянисто-кустарниковая растительность. В северной части города располагается Тарманский озерно-болотный комплекс с преобладанием в понижениях рельефа осоковых лугов. На озелененных территориях в пределах городской застройки практически все виды древесно-кустарниковой растительности являются искусственными насаждениями [47].

Расчет вегетационного индекса. Для исследования городской системы озеленения были использованы мультиспектральные космические данные продукта Sentinel-2A, предоставленные с сайта геокосмической информации [48]. При отборе снимков ключевыми критериями служили минимальная облачность и период максимального развития вегетационной массы. Временным интервалом для исследования выбран июль 2024 г. (месяц пика вегетации). Было доступно 23 космоснимка территории Тюмени с разным уровнем облачности — 0 до 88 %, из которых отобрали снимки с минимальными значениями облачности (<10 %). Данные, полученные с помощью продукта Sentinel-2A, имеют разрешение 10 м и каждый пиксель на космическом изображении соответствует размеру 10×10 м на местности. Такая детализация позволяет точно дифференцировать различные типы поверхности: лес, водные объекты, почвы,

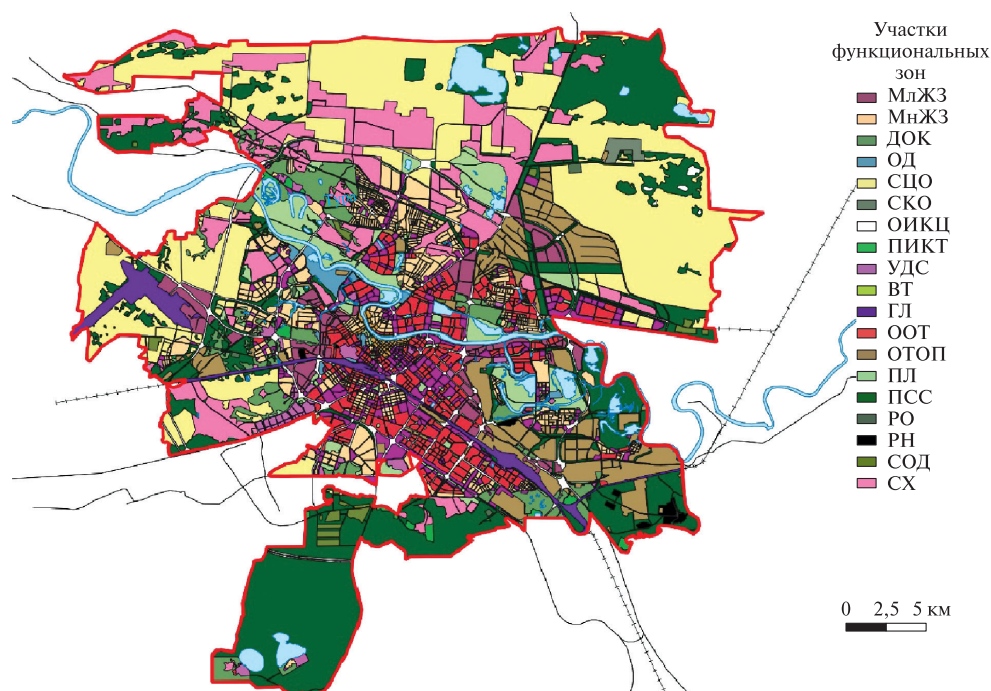


Рис. 1. Функциональное зонирование г. Тюмени [53]: МлЖЗ — малоэтажная жилая застройка; МнЖЗ — многоэтажная жилая застройка; ДОК — объекты делового, общественного и коммерческого назначения; ОД — общественно-деловые объекты; СЦО — специализированные центры обслуживания; СКО — спортивные комплексы; ОИКЦ — объекты историко-культурного центра; ПИКТ — промышленные, инженерные, коммунальные и транспортные объекты; УДС — улично-дорожная сеть; ВТ — внешний транспорт; ГЛ — городские леса; ООТ — объекты отдыха и туризма; ОТОП — озелененные территории общего пользования; ПЛ — природный ландшафт; ПСС — полигоны для складирования снега; РО — режимные объекты; РН — ритуального назначения; СОД — садовые и дачные объекты; СХ — сельскохозяйственные объекты

Fig. 1. Functional zoning of Tyumen [53]: MLZHZ — low-rise residential buildings; MNZHZ — multi-storey residential buildings; DOCK — business, public and commercial facilities; ML — public and business facilities; NSC — specialized service centers; SKO — sports complexes; DECC — historical and cultural center facilities; PICT — industrial, engineering, municipal and transport facilities; UDS — street and road network; VT — external transport; GL — urban forests; OOT — recreation and tourism facilities; OOT — green areas of common use; PL — natural landscape; PSS — landfills for storing snow; RO — high-security facilities; PH — ritual purposes; SOD — garden and suburban; CX — agricultural

дороги и застроенные территории, что особенно важно при анализе зеленой инфраструктуры города [32, 35, 49].

В процессе обработки космических данных был выполнен NDVI в геоинформационной системе QGIS 3.36. С помощью этого индекса проведен анализ распространения и текущего состояния системы озеленения Тюмени. NDVI рассчитывается как отношение разности между ближней инфракрасной и красной отражательной способностью к их сумме. Этот показатель позволяет оценить степень развития растительного покрова [50]. Общая формула для расчета индекса имеет вид

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + RED},$$

где NIR — отражение солнечного света в ближнем инфракрасном диапазоне;

RED — отражение солнечного света в красном диапазоне спектра [51, 52].

Диапазон значений NDVI изменяется от –1 до +1. Наличие растительности фиксируется его положительными значениями. Высокие значения соответствуют областям с густой растительностью.

Выделение функциональных зон города.

Разработана детализированная векторная карта функционального зонирования территории городского округа Тюмень (рис. 1). На ее основе оценены показатели уровня озеленения и доли древесного покрова. Для повышения точности анализа городские функциональные зоны были разделены на отдельные выделы.

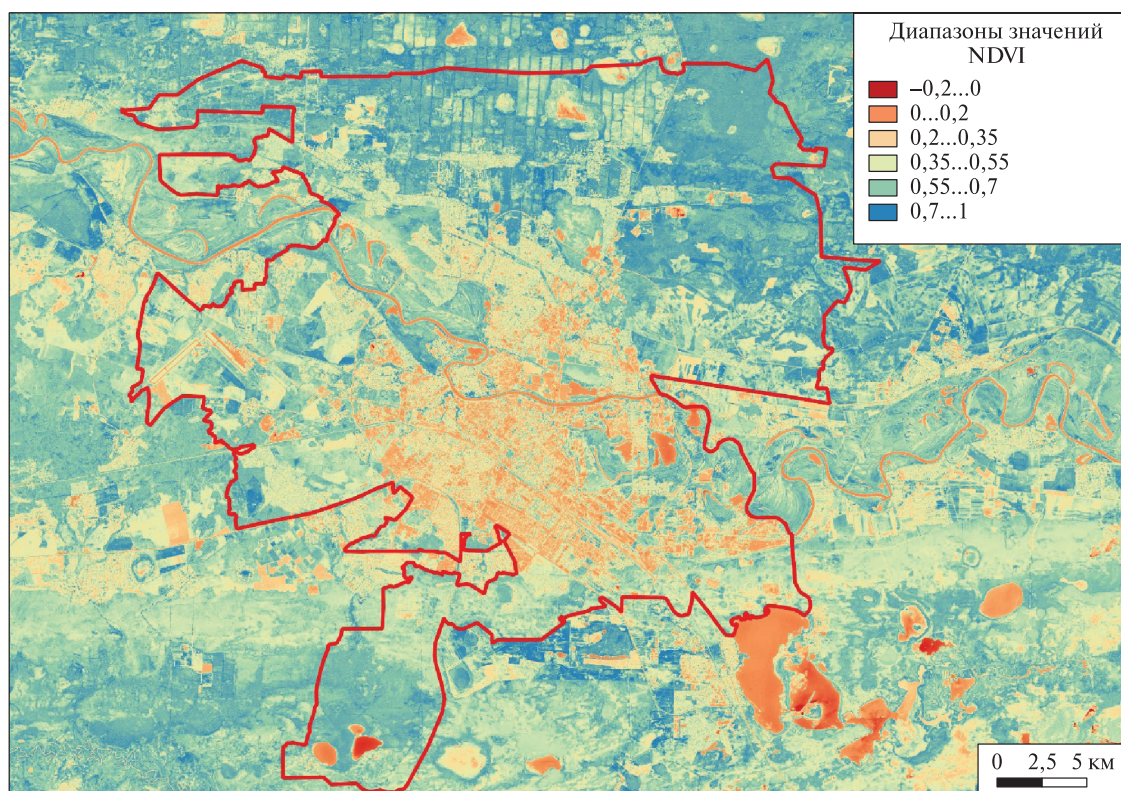


Рис. 2. Карта территории городского округа Тюмень, классифицированной на основе ранжирования значений NDVI

Fig. 2. Tyumen territory map based on the ranking of NDVI values

В результате выполненных работ отрисовано 3065 выдела (см. рис. 1), объединенные в шесть основных функциональных зон города: жилую, общественно-деловую, рекреационную, промышленную, специального назначения и сельскохозяйственную.

Оценка уровня озеленения и доли представленности древесных насаждений. Расчет уровня озеленения и доли представленности древесных насаждений осуществлен в геоинформационной системе QGIS 3.36 с помощью специализированных модулей. Под показателем «уровень озеленения» в настоящей работе следует понимать соотношение количества пикселей, отображающих растительность, к общему числу пикселей в пределах функционального выдела. Были учтены все типы растительности — травянистой, кустарниковой, древесной, которая произрастает в пределах города. Аналогичный подход применен для анализа показателя «доля древесных насаждений». В этом случае были учтены все древесные насаждения, включая одиночные деревья, рядовые посадки, групповые насаждения и лесопарковые зоны.

В основе анализа рассчитанных показателей лежали данные растрового слоя карты (рассчи-

танный вегетационный индекс) и векторного слоя (функциональное зонирование). В модуле «Зональная статистика» были определены средние, минимальные и максимальные значения NDVI для каждой функциональной зоны города. Далее с помощью «Калькулятора растров» были получены карты NDVI со значениями от 0,2 до 1,0 (вся растительность) и от 0,7 до 1 (исключительно древесная растительность). В модуле «Зональная гистограмма» получены необходимые итоговые значения для расчета показателей. В завершение с помощью инструмента «Калькулятор полей» были определены уровень озеленения (%) и доля древесных насаждений (%) по функциональным зонам Тюмени. Анализ полученных результатов проводился с шагом 10 % (от 0 до 100 %), что целесообразно для анализа больших городов и распределения объектов зеленой инфраструктуры [31].

Результаты и обсуждение

Анализ значений NDVI. На основе ранжирования значений NDVI для Тюмени установлено, что его значения находятся в пределах от $-0,2$ до $+0,96$ (рис. 2).

Оценка современного состояния зеленой инфраструктуры (г. Тюмень)

Assessment of the current state of the Tyumen city's green infrastructure

Функциональная зона	Площадь, км ²	Уровень озеленения, %	Доля древесных насаждений, %
Жилая зона, всего	85,5	45	5
в том числе			
зона малоэтажной застройки		51	6
зона многоэтажной застройки		39	4
Общественно-деловая зона, всего	61,6	50	10
в том числе			
историко-культурный центр		20	5
специализированные центры обслуживания		67	12
общественные, деловые и коммерческие объекты		34	6
спортивные комплексы и сооружения		61	16
Зона производственной, инженерной и транспортной инфраструктуры, всего	97,5	57	9
в том числе			
зона внешнего транспорта		67	5
улично-дорожная сеть		45	7
производственные, коммунальные, инженерные и складские объекты		60	15
Рекреационная зона, всего	207,4	83	37
в том числе			
городские леса		95	52
озелененные территории общего пользования		70	39
природные ландшафты		92	50
объекты отдыха и туризма		74	7
Зона специального назначения, всего	8,65	63	17
в том числе			
зона полигонов для складирования снега		47	6
режимные объекты		46	6
зона ритуального назначения		95	38
Сельскохозяйственная зона, всего	176,2	87	22
в том числе			
территории сельскохозяйственного назначения		93	30
территории садоводческих хозяйств		82	15
Всего по городу*	636,85	64	16

*Общие данные приведены без учета площади водных объектов и некоторых территорий, не отнесенных к функциональному зонированию.

Ранее зарубежными и отечественными коллегами [31, 32, 35, 36, 39, 40] было показано, что городские территории, имеющие значение NDVI ниже 0,2, характеризуются как участки без растительности. Для Тюмени получены схожие результаты. На карте красным цветом обозначены участки города со значением NDVI в пределах от -0,2 до 0, что указывает на полное отсутствие растительного покрова. Отрицательные значения NDVI характерны для участков с различными водными объектами, например р. Тура и ее пойменные водоемы.

Городские территории (на карте показаны оранжевым цветом), которым соответствуют значения NDVI 0...0,2, характеризуются сильно разреженным растительным покровом и высокой долей непроницаемых искусствен-

ных покрытий, таких как бетон и асфальт, например: тротуары, автомобильные дороги, асфальтированные площадки, промышленные предприятия, многоэтажные жилые дома, торгово-развлекательные центры, песчаные карьеры и т. п. Площадь таких непроницаемых участков в Тюмени составляет 415 км² (59,5 %).

Большая доля непроницаемых участков сосредоточена в центральной и юго-восточной частях города, где располагается застройка с переменной этажностью и новая высокоплотная жилая застройка (см. рис. 2). Например, новые районы многоэтажной жилой застройки (Ново-Патрушево, Тюменская слобода, Плеханово, новые микрорайоны в Заречной части и другие). Территория многих жилых комплексов на 85 % состоит из искусственных поверхностей

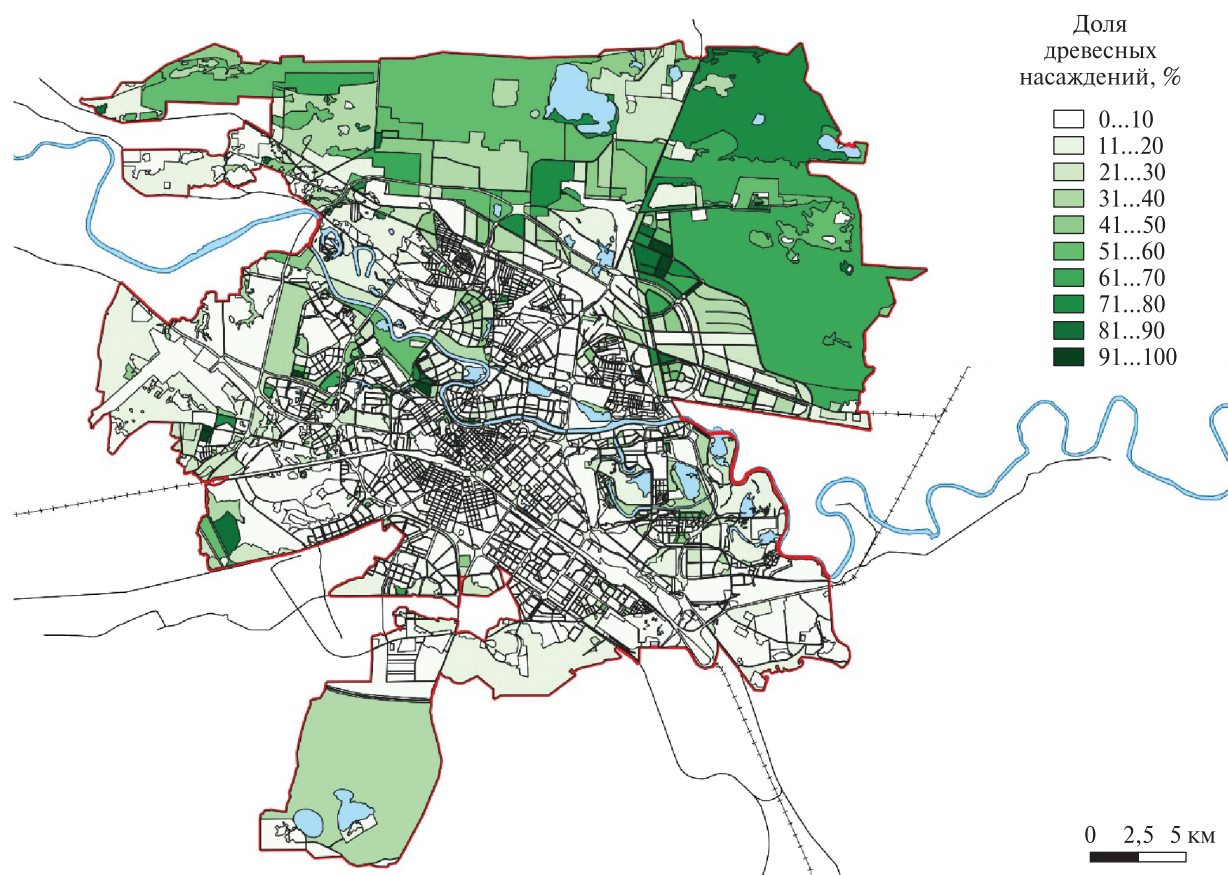


Рис. 3. Доля древесных насаждений на территории городского округа Тюмень
Fig. 3. The proportion of tree plantations in Tyumen

и только 15 % приходится на газоны у жилых зданий с травянистой растительностью и недавно высаженными кустарниками и деревьями. Ранее было показано [26], что именно эти участки Тюмени создают тепловой стресс для населения в летний период и требуют «охлаждающего эффекта». Если учесть, что здесь проживает около 87 % населения города, становится очевидной необходимость увеличения плотности растений в густонаселенных районах города.

Неоднократно было показано, что именно городские участки с непроницаемыми поверхностями характеризуются повышенными значениями температуры и приводят к возникновению эффекта городского теплового острова [26, 54], который представляет опасность для здоровья населения. К примеру, он влияет на вертикальное перемешивание загрязнителей воздуха и определяет их дневную концентрацию, что приводит к респираторным заболеваниям [41] и может вызывать тепловой стресс организма, характеризующийся нарушением физиологических процессов терморегуляции [11].

Значения NDVI в пределах от 0 до 0,1 имеют также участки с расположенными в их пределах

неглубокими озерами (оз. Алебашево), прудами (Южный, Чистый, Дамбовский, Школьный и т. д.) и промышленными карьерами.

Районам города с малоэтажной жилой застройкой (коттеджи и частный сектор) в микрорайонах Нефтяник, Парфеново и садовым и дачным товариществам (Геолог-3, Автотранспортник-2, Солнышко и др.) характерны значения NDVI 0,2...0,35. Застройка здесь менее плотная, доля непроницаемых поверхностей ниже, соответственно, выше площадь озелененных пространств: придорожные газоны и древесно-кустарниковых насаждений (преимущественно из тополя, клена, березы, липы, яблони) вдали домов и улиц, а также во дворах. Диапазон более высоких значений NDVI 0,2...0,55 отмечен для некоторых участков с разреженным травянистым покровом, например, с луговой растительностью в пойме р. Туры и на городской набережной.

Территории небольших скверов, зеленых зон у жилых и общественных зданий, а также участки вдоль крупных автомобильных дорог имеют диапазон значений NDVI 0,35...0,55. Здесь развит растительный покров из травяни-

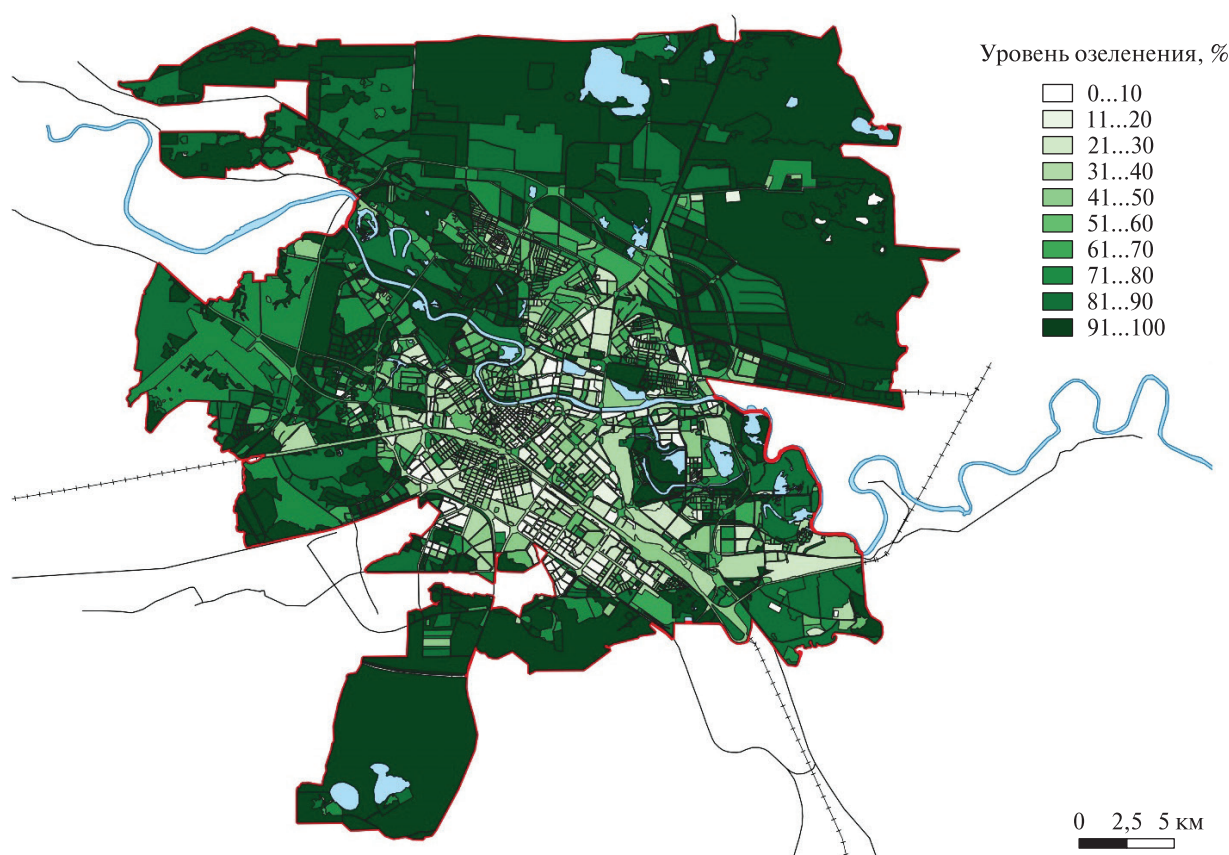


Рис. 4. Дифференцированная картосхема значений уровня озелененности городского округа Тюмень
Fig. 4. Differentiated cartography of the landscaping in the city of Tyumen

стых растений в сочетании с редкими деревьями и кустарниками.

Значения NDVI выше 0,5 характерны для городских территорий с хорошо развитым растительным покровом [39, 40]. Участки ландшафтов с луговой и кустарниковой растительностью, которым соответствуют значения вегетационного индекса от 0,55 до 0,7, показаны зеленым цветом (см. рис. 2), например влажные луга и заросли кустарников в пойме р. Туры. Городские территории с максимальными значениями NDVI 0,7...1 окрашены синим цветом (см. рис. 2) — это участки с древесными насаждениями.

Анализ уровня древесных насаждений по функциональным зонам. Доля древесных насаждений достигает самых высоких показателей в рекреационной функциональной зоне (таблица, рис. 3). Это природные и природоподобные ландшафты: участки городских сосновых и березовых лесов, парки — Лесопарк им. Ю.А. Гагарина, Гилёвская роща, Плехановский бор, Верхний бор и др., скверы — Сквер Нефтяников, Сквер Сибирский и др., Памятник природы регионального значения «Тополя».

В зонах специального назначения участие древесных растений выше, в частности на участках ритуального назначения (Текутьевское кладбище) и сельскохозяйственной зоне с благоустроенными территориями, покрытыми древесно-кустарниковой растительностью, которые расположены в северо-восточной части города.

В жилой части города доля площадей, занятых древесными насаждениями, не превышает 20 %. Участки с деревьями отмечены на участках торгово-развлекательных и спортивных объектов, вдоль автомобильных дорог (Тобольский проспект, Текутьевский бульвар, ул. Береговая, Сиреневая и др.).

Самая низкая представленность древесных насаждений отмечается в зоне жилой застройки (см. таблицу, рис. 3). При этом доля древесной растительности выше в зоне малоэтажной застройки 1960–1980 гг. и ниже — в районах 12–16-этажной застройки 2000–2020 гг. Кварталы с новой многоэтажной застройкой занимают большую площадь города. Особенно активно застраиваются высокие террасы правобережья и заболоченные низкие террасы левобережья

р. Туры. В новых кварталах зеленая инфраструктура только начала формироваться и редкие посаженные деревья не успели разрастись.

В целом в Тюмени только 22 % площади занято древесными насаждениями. Соответственно, почти 80 % территории города (558,8 км²) характеризуются низким уровнем участия древесных растений — менее 30 % (см. таблицу, рис. 3). Особенно остро дефицит деревьев наблюдается в кварталах с новой многоэтажной застройкой. В то же время именно на древесные растения приходится широкий спектр экосистемных услуг. Соответственно, при планировании очень важно уделить пристальное внимание более масштабному внедрению древесных растений в городское озеленение.

Характеристика уровня озеленения города.

Озелененность функциональных зон напрямую связана с NDVI. Чем выше его значение, тем выше больше степень озеленения, и наоборот. С помощью общего количества пикселей со значениями NDVI, соответствующими растительности, построена дифференцированная картосхема озелененности (рис. 4). В целом низким уровнем озеленения характеризуются центральная застроенная часть города, а по направлению к окраинам уровень озеленения повышается, достигая максимальных значений.

Самый высокий уровень озеленения — 60...100 % характерен для рекреационной и сельскохозяйственной функциональных зон. В пределах рекреационной зоны максимальные значения озелененности отмечены на участках природных ландшафтов и городских лесопарков — 92 и 95 % соответственно. На озелененных территориях общего пользования и в туристических зонах уровень озеленения снижается (70 и 74 % соответственно), что отражает наличие искусственных поверхностей и сокращение растительного покрова. Примечательно, что одни из самых высоких показателей озеленения обнаружены в зоне специального назначения на территориях городских кладбищ (см. таблицу).

В селитебной части города (80 км², или 55 % площади) уровень озеленения не превышает 50 %. В жилой зоне процент озеленения территории ниже средних значений по городу. В частности, в зоне многоэтажной застройки он составляет 39 %, а в историко-культурном центре города, где сосредоточена туристическая инфраструктура — только 20 % (см. таблицу).

Выводы

Анализ уровня озеленения г. Тюмени с помощью методов ДЗЗ показал крайне неравномерное распределение зеленых насаждений по

территории города. Высокий уровень озеленения характерен для периферийных районов города, где сохраняются участки природных ландшафтов. Селитебная часть города испытывает острый недостаток зеленых насаждений. Зоны жилой застройки, общественно-деловая, производственной и инженерной инфраструктуры характеризуются самым низким уровнем озеленения. В центральной части города в районах жилой застройки отсутствуют крупные лесопарки (ядра экологического каркаса), и они не связаны между собой. Система коридоров (пешеходные аллеи, бульвары), связывающая между собой узлы экологического каркаса (небольшие парки, скверы) развита слабо или отсутствует.

Еще одна особенность зеленой инфраструктуры г. Тюмени — недостаток древесных насаждений: почти 80 % территории города (558,8 км²) характеризуется низким уровнем участия древесных растений — менее 30 %. Особенно остро дефицит деревьев наблюдается в кварталах с новой многоэтажной застройкой. Отчасти это можно объяснить тем, что в новых кварталах зеленые насаждения только начинают формироваться, имеют небольшой возраст и не успели разрастись. Обширные участки городской набережной у р. Туры лишены древесной растительности по объективным причинам.

Обширная площадь, занимаемая непроницаемыми искусственными поверхностями (около 60 %), и недостаток древесных насаждений, которыми занято только 22 % площади города, отрицательно сказываются на состоянии окружающей среды, особенно в условиях глобальных климатических изменений.

Для улучшения экологической обстановки и формирования комфортной среды для населения необходимо увеличение как общей площади озелененных пространств, так и доли древесных насаждений. С этой целью, в программы развития города следует включать разработку и реализацию мероприятий по следующим направлениям:

- отведение площадей и создание крупных лесопарковых комплексов, в первую очередь в зонах массового жилищного строительства;
- интеграция долины р. Туры и ее притоков в систему зеленых коридоров экологического каркаса;
- увеличение доли древесных насаждений вдоль линейных объектов — защитных полос вдоль железных дорог и автомагистралей, формирование озелененных пешеходных аллей и бульваров;
- повышение общего уровня озеленения зон жилой застройки и производственного назначения, в том числе за счет точечного озеленения

и формирования нестандартных зеленых пространств (мобильных объектов, террас жилых домов и общественных зданий, дренажных систем, живых изгородей и т. п.).

В качестве одного из мероприятий можно предложить разработку правил благоустройства улиц, общественных пространств, дворов. Подобные работы проведены в г. Екатеринбурге [55]. Отличительной особенностью новых стандартов благоустройства должна стать идея обеспечения равновесия природных и антропогенных элементов города, устойчивости городских экосистем, сохранения биологического разнообразия на городской территории и повышения качества жизни населения. Особое внимание следует уделить набережным, поскольку сегодня их благоустройство представлено гранитными парапетами и мощением, в связи с чем возникают тепловые острова и участки с повышенной ветровой нагрузкой, непригодные для использования в рекреационных целях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, тема № 1021062311241-6-1.6.20; 1.6.22; 1.6.15; 1.15.12 (FWUG2024-0005); Института проблем освоения Севера Тюменского научного центра СО РАН, тема № 1025031300145-5-1.5.1 (FWRZ-2026-0022); Ботанического сада УрО РАН, тема № 123112700111-4. Работа выполнена при поддержке ООО «Брусника» в рамках направления деятельности НИОКР «Устойчивый ландшафт. Расширенные возможности озеленения».

Список литературы

- [1] McKinney M.L. Urbanization as a major cause of biotic homogenization // *Biological Conservation*, 2006, v. 127, pp. 247–260.
- [2] McKinney M.L. Urbanization, biodiversity, and conservation. The impacts of urbanization on native species are poorly studied, but educating a highly urbanized human population about these impacts can greatly improve species conservation in all ecosystems // *Bioscience*, 2002, v. 52 (10), pp. 883–890.
- [3] Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island // *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society*, 1982, v. 108(455), pp. 1–24.
- [4] Oke T.R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects / Cermak JE (ed) // *Windclimate in cities Netherlands*: Kluwer Academic Publishers, 1995, pp. 81–107.
- [5] Jenerette G.D., Harlan S.L., Brazel A., Jones N., Larsen L., Stefanov W.L. Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem // *Landscape Ecology*, 2007, v. 22, pp. 353–365.
- [6] Connors J.P., Galletti C.S., Chow W.T.L. Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona // *Landscape Ecology*, 2013, v. 28 (2), pp. 271–283.
- [7] Gober P. Desert urbanization and the challenges of water sustainability // *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, v. 2 (3), pp. 144–150.
- [8] Ziter C. The biodiversity-ecosystem service relationship in urban areas: a quantitative review // *Oikos*, 2016, v. 125(6), pp. 761–768.
- [9] Schwarz N., Moretti M., Bugalho M.N., Davies Z.G., Haase D., Hack J., et al. Understanding biodiversity-ecosystem service relationships in urban areas: A comprehensive literature review // *Ecosystem services*, 2017, v. 27(A), pp. 161–171.
- [10] Аналитическая записка: Устойчивое городское и пригородное лесное хозяйство, основанное на природных принципах: комплексное и инклюзивное решение в интересах «зеленого» восстановления и устойчивых, здоровых и жизнестойких городов. URL: <https://unece.org/info/publications/pub/373690> (дата обращения 19.09.2024).
- [11] Forman R.T.T. *Urban ecology: science of cities*. UK: Cambridge University Press, 2014, 480 p.
- [12] Морозова Г.Ю., Дебеляя И.Д. Зеленая инфраструктура как фактор обеспечения устойчивого развития Хабаровска // *Экономика региона*, 2018. Т. 14. № 2. С. 562–574.
- [13] Strohbach M.W., Arnold E., Haase D. The carbon footprint of urban green space — a life cycle approach // *Landscape and Urban Planning*, 2012, v. 104, no. 2, pp. 220–229.
- [14] Brack C.L. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest // *Environmental Pollution*, 2002, v. 116, pp. 195–200.
- [15] Alberti M. The effects of urban patterns on ecosystem function // *International Regional Science Review*, 2005, v. 28(2), pp. 168–192.
- [16] Westphal L.M. Social Aspects of Urban Forestry: Urban Greening and Social Benefits: A Study of Empowerment Outcomes // *Arboriculture & Urban Forestry*, 2003, v. 29(3), pp. 137–147.
- [17] Dadvand P. Green spaces and cognitive development in primary schoolchildren // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, v. 112, no. 26, pp. 7937–7942.
- [18] Çakar H., Gülgün B., Yazici K. The importance of green areas for human health // *Proceeding Book of International Symposium for Environmental Science and Engineering Research (ISESER 2021)*, 2021, pp. 66–72.
- [19] Ревич Б.А. Значение зеленых пространств для защиты здоровья населения городов // *Анализ риска здоровью*, 2023. № 2. С. 168–185.
- [20] Kuhn N. Intentions for the unintentional spontaneous vegetation as the basis for innovative planting design in urban areas // *J. of Landscape Architecture*, 2006, v. 1, no. 2, pp. 46–53.
- [21] Ignatieva M., Meurk C., Stewart G. Low Impact Urban Design and Development (LIUDD): matching urban design and urban ecology // *Landscape Review*, 2008, v. 12, no. 2, pp. 61–73.

- [22] Алексейчук Я.Д., Керимова Н.А. Современные направления озеленения общественных интерьеров // *Ландшафтная архитектура, строительство и обработка древесины: Материалы науч.-техн. конф. СПбГЛТУ по итогам НИР 2017 г. ИЛАСи-ОД*, Санкт-Петербург, 15–16 февраля 2018 г / под ред. И.А. Мельничук. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 2018. С. 72–74.
- [23] Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Экологический каркас крупнейших городов Российской Федерации: современная структура, территориальное планирование и проблемы развития // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 2018. Т. 63. № 2. С. 127–146.
- [24] Морозова Г.Ю., Дебеляя И.Д. Анализ проблем озеленения современного города (на примере Хабаровска) // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*, 2018. № 4. С. 38–48.
- [25] Калманова В.Б. Анализ формирования зеленого каркаса в планировочной структуре г. Биробиджана // *Региональные проблемы*, 2019. Т. 22. № 3. С. 70–77.
- [26] Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 3. Зеленая инфраструктура и экосистемные услуги крупнейших городов России. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2021. 112 с.
- [27] Макаренко В.П., Фетисов Д.М., Жучков Д.В. Изучение растительного покрова малых и средних городов России: современное состояние // *Региональные проблемы*, 2022. Т. 25. № 1. С. 3–15.
- [28] Глазунов В.А., Третьякова А.С., Чижов Е.А. Флористическое разнообразие современного экологического каркаса г. Тюмени // *Биосфера*, 2023. Т. 15. № 4. С. 335–342.
- [29] Shikhova N. S. Functional Efficiency of the Woody Vegetation Species Composition in Urban Green Spaces // *Russian J. of Ecology*, 2023, v. 54, no. 6, pp. 693–703.
- [30] Lu Y., Coops N. C., Hermosilla T. Estimating urban vegetation fraction across 25 cities in pan-Pacific using Landsat time series data // *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, v. 126, pp. 11–24.
- [31] Кравчук Л.А., Яновский А.А., Баженова Н.М., Пац А.Ч. Дифференцированная оценка зеленой инфраструктуры г. Минска с использованием данных дистанционного зондирования Земли // *Природопользование*, 2019. № 2. С. 152–167.
- [32] 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.
- [33] Abutaleb K., Mudede M.F., Nkongolo N., Newete S.W. Estimating urban greenness index using remote sensing data: A case study of an affluent vs poor suburbs in the city of Johannesburg // *The Egyptian J. of Remote Sensing and Space Sciences*, 2021, v. 24, pp. 343–351.
- [34] 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(67). С. 218–232.
- [35] Жучков Д.В., Фетисов Д.М. Оценка современного состояния растительного покрова г. Облучье по мультиспектральным данным // *Региональные проблемы*, 2024. Т. 27. № 1. С. 112–124.
- [36] Соколов А.С. Распределение вегетационного индекса NDVI на территории Гомеля // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины*, 2024. № 3(144). С. 52–55.
- [37] Ceballos-Silva A., López-Blanco J. Delineation of suitable areas for crops using a Multi Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico // *Agricultural Systems*, 2003, v. 77(2), pp. 117–136.
- [38] Anitha V., Prabha D. Role of NDVI in Assessing Surface Urban Heat Island phenomenon: A Case Study of Alappuzha District, Kerala // *J. of Materials and Environmental Science*, 2024, v. 15(9), pp. 1331–1346.
- [39] Hashim H., Abd Latif Z., Adnan N.A. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) pleiades imagery // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, v. XLII-4/W16, pp. 237–240.
- [40] Aryal J., Sitaula C., Aryal S. NDVI Threshold-Based Urban Green Space Mapping from Sentinel-2A at the Local Governmental Area (LGA) Level of Victoria, Australia // *Land*, 2022, v. 11(3), p. 351.
- [41] Lee G., Kim G., Min G., Kim M., Jung S., Hwang J., Cho S. Vegetation Classification in Urban Areas by Combining UAV-Based NDVI and Thermal Infrared Image // *Applied Sciences*, 2023, v. 13(1), p. 515.
- [42] Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, v. 16, pp. 9563–9577.
- [43] Kandel S., Gyawali B., Sandifer J., Shrestha S., Upadhyaya S. Assessment of Urban Heat Islands (UHIs) Using Satellite-Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Land Surface Temperature (LST) in Three Metropolitan Cities of Nepal // *Banko Janakari*, 2022, v. 32, no. 2, pp. 37–51.
- [44] Гусейнов А.Н. Экология города Тюмени: состояние, проблемы. Тюмень: Слово, 2001. 176 с.
- [45] Старков В.Г., Тюлькова Л.А. Геологическая история и минеральные богатства Тюменской земли. Тюмень: ИПП «Тюмень», 1996. 192 с.
- [46] Тюмень начала XXI века. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2002. 335 с.
- [47] Глазунов В.А., Хозяинова Н.В., Хозяинова Е.Ю. Флора города Тюмени // *Фиторазнообразие Восточной Европы*, 2020. Т. XIV. № 4. С. 420–497.
- [48] Copernicus Browser. URL: <https://606.su/cvxR>. (дата обращения 01.08.2024).
- [49] Kuc G., Chormański J. Sentinel-2 imagery for mapping and monitoring imperviousness in urban areas // *Int. Arch. Photogrammetry Remote Sens. Spatial Informat Sci*, 2019, (XLII-1/W2), pp. 43–47.
- [50] Dissanayake D.M.S.L.B., Morimoto T., Ranagalage M., Murayama Y. Land-use/land-cover changes and their impact on surface urban heat islands: Case study of Kandy City, Sri Lanka // *Climate*, 2019, v. 7(8), p. 99.
- [51] Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote sensing of Environment*, 1979, v. 8(2), pp. 127–150.

- [52] Townshend J.R., Justice C.O. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index // *International J. of remote sensing*, 1986, v. 7(11), pp. 1435–1445.
- [53] Приложение 1 к Постановлению Администрации города Тюмени от 30.09.2024 № 151-пк «О внесении изменений в постановление Администрации города Тюмени от 28.06.2021 № 124-пк» // Администрация города Тюмени. Официальный портал. URL: <https://www.tyumen-city.ru/> (дата обращения 30.08.2024).
- [54] Carpio M., González Á., González M., Verichev K. Influence of pavements on the urban heat island phenomenon: A scientific evolution analysis // *Energy and Buildings*, 2020, v. 226, p. 110379.
- [55] Банникова Л.А., Хриченков А.В., Бурцев А.Г., Тиганова И.А., Третьякова А.С., Груданов Н.Ю., Владыкина В.Д. Принципы формирования подхода к благоустройству озелененных пространств Екатеринбурга // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 6. С. 106–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-106-113

Сведения об авторах

Жучков Дмитрий Витальевич✉ — мл. науч. сотр., аспирант, ФГБУН «Институт комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКАРП ДВО РАН), dmitriy.zhuchkov.2000@mail.ru

Глазунов Валерий Александрович — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ТюмНЦ СО РАН), v_gl@inbox.ru

Третьякова Алена Сергеевна — д-р биол. наук, директор ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (БС УрО РАН), as.tretyakova1@yandex.ru

Фетисов Денис Михайлович — канд. геогр. наук, ст. науч. сотр., директор ФГБУН «Институт комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКАРП ДВО РАН), dmf.mail@yandex.ru

Бурцев Александр Геннадьевич — руководитель отдела научных исследований подразделения НИОКР, Общество с ограниченной ответственностью «Брусника». Специализированный застройщик», a.burtsev@brusnika.ru

Хриченков Алексей Владимирович — руководитель подразделения НИОКР, Общество с ограниченной ответственностью «Брусника». Специализированный застройщик», khrichenkov@brusnika.ru

Поступила в редакцию 20.03.2025.

Одобрено после рецензирования 06.05.2025.

Принята к публикации 28.11.2025.

CURRENT STATE OF GREEN INFRASTRUCTURE IN TYUMEN

D.V. Zhuchkov¹, V.A. Glazunov², A.S. Tret'yakova³,
D.M. Fetisov¹, A.V. Khrichenkov⁴, A.G. Burtsev⁴

¹Institute for Complex Analysis of Regional Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (ICARP FEB RAS), 4, Sholom Aleichem st., 679016, EAO, Birobidzhan, Russia

²Tyumen Scientific Centre SB RAS, 86, Malygina st., 625026, Tyumen, Russia

³Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, 202a, 8 Marta st., 620144, Yekaterinburg, Russia

⁴The R&D department of LLC «Brysnika», 18 Gogol st., 620026, Yekaterinburg, Russia

dmitriy.zhuchkov.2000@mail.ru

Research on green infrastructure in cities is becoming particularly relevant against the background of an increasing number of cities and the urban population. In order to achieve sustainable development of urbanized territories and create a favorable environment, there is a need to obtain data on the structure and condition of urban vegetation. However, the use of traditional research methods makes this task difficult. The article analyzes the current state of the green infrastructure based on the data of remote sensing of the Earth using the example of a large city of Tyumen. The analysis of the spatial distribution of urban vegetation across the city is based on the results of the calculation of the normalized vegetation index (NDVI) based on Sentinel-2A satellite images. It was found that NDVI values of 0.2 or more are the boundary values for highlighting the green spaces of the city, NDVI 0.75 or more for woody vegetation. NDVI values less than 0.2 characterize the impenetrable surfaces of the city (paved areas, building sites, sand pits, etc.), the area of which in Tyumen is more than 59 %. The indicators «proportion of tree stands» and «level of landscaping» were analyzed for the rendered sections of the functional zones of the city. It is revealed that the distribution of green spaces across the city is uneven. The proportion of tree stands reaches its maximum (50 % and above) in the recreational area, where natural and nature-like landscapes are located, while in the residential part of the city this indicator, on the contrary, is minimal. It is estimated that 22 % of the territory of Tyumen is covered with tree plantations. An assessment of the landscaping of functional areas of the city revealed a similar pattern: a high level of landscaping (60 % and above) is typical for peripheral areas of the city, while there is a clear lack of greenery in residential and public-business buildings. Consequently, in order to improve the environmental situation and create a comfortable urban environment, it is necessary to expand the green spaces, especially in neighborhoods with new buildings and in areas of the city's public and business zone.

Keywords: green infrastructure, level of landscaping, proportion of tree stands, green spaces, remote sensing, NDVI, Tyumen

Suggested citation: Zhuchkov D.V., Glazunov V.A., Tret'yakova A.S., Fetisov D.M., Khrichenkov A.V., Burtsev A.G. *Sovremennoe sostoyanie zelenoy infrastruktury goroda Tyumeni* [Current state of green infrastructure in Tyumen]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 1, pp. 74–88.

DOI: 10.18698/2542-1468-2026-1-74-88

References

- [1] McKinney M.L. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 2006, v. 127, pp. 247–260.
- [2] McKinney M.L. Urbanization, biodiversity, and conservation. The impacts of urbanization on native species are poorly studied, but educating a highly urbanized human population about these impacts can greatly improve species conservation in all ecosystems. *Bioscience*, 2002, v. 52 (10), pp. 883–890.
- [3] Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society*, 1982, v. 108(455), pp. 1–24.
- [4] Oke T.R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. Cermak JE (ed) *Windclimate in cities*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995, pp. 81–107.
- [5] Jenerette G.D., Harlan S.L., Brazel A., Jones N., Larsen L., Stefanov W.L. Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem. *Landscape Ecology*, 2007, v. 22, pp. 353–365.
- [6] Connors J.P., Galletti C.S., Chow W.T.L. Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona. *Landscape Ecology*, 2013, v. 28 (2), pp. 271–283.
- [7] Gober P. Desert urbanization and the challenges of water sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, v. 2 (3), pp. 144–150.
- [8] Ziter C. The biodiversity-ecosystem service relationship in urban areas: a quantitative review. *Oikos*, 2016, v. 125(6), pp. 761–768.
- [9] Schwarz N., Moretti M., Bugalho M.N., Davies Z.G., Haase D., Hack J., et al. Understanding biodiversity-ecosystem service relationships in urban areas: A comprehensive literature review. *Ecosystem services*, 2017, v. 27(A), pp. 161–171.

- [10] *Analiticheskaya zapiska: Ustoychivoe gorodskoe i prigorodnoe lesnoe khozyaystvo, osnovannoe na prirodnnykh printsipakh: kompleksnoe i inkluzivnoe reshenie v interesakh «zelenogo» vosstanovleniya i ustoychivyykh, zdorovykh i zhiznestoykikh gorodov* [Analytical note: Sustainable urban and suburban forestry based on natural principles is a comprehensive and inclusive solution for the benefit of green recovery and sustainable, healthy and resilient cities]. Available at: <https://unece.org/info/publications/pub/373690> (accessed 19.09.2024).
- [11] Forman R.T.T. Urban ecology: science of cities. UK: Cambridge University Press, 2014, 480 p.
- [12] Morozova G.Yu., Debelaya I.D. *Zelenaya infrastruktura kak faktor obespecheniya ustoychivogo razvitiya Khabarovska* [Green infrastructure as a factor in ensuring the sustainable development of Khabarovsk]. *Ekonomika regiona* [Economy of the region], 2018, v. 14, no. 2, pp. 562–574.
- [13] Strohbach M.W., Arnold E., Haase D. The carbon footprint of urban green space — a life cycle approach. *Landscape and Urban Planning*, 2012, v. 104, no. 2, pp. 220–229.
- [14] Brack C.L. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. *Environmental Pollution*, 2002, v. 116, pp. 195–200.
- [15] Alberti M. The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review*, 2005, v. 28(2), pp. 168–192.
- [16] Westphal L.M. Social Aspects of Urban Forestry: Urban Greening and Social Benefits: A Study of Empowerment Outcomes. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2003, v. 29(3), pp. 137–147.
- [17] Dadvand P. Green spaces and cognitive development in primary schoolchildren. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, v. 112, no. 26, pp. 7937–7942.
- [18] Çakar H., Gülgün B., Yazıcı K. The importance of green areas for human health. *Proceeding Book of International Symposium for Environmental Science and Engineering Research (ISESER 2021)*, 2021, pp. 66–72.
- [19] Revich B.A. *Znachenie zelenykh prostranstv dlya zashchity zdorov'ya naseleniya gorodov* [The importance of green spaces for protecting the health of urban populations]. *Analiz riska zdorov'yu* [Health risk analysis], 2023, no. 2, pp. 168–185.
- [20] Kuhn N. Intentions for the unintentional spontaneous vegetation as the basis for innovative planting design in urban areas. *J. of Landscape Architecture*, 2006, v. 1, no. 2, pp. 46–53.
- [21] Ignatieva M., Meurk C., Stewart G. Low Impact Urban Design and Development (LIUDD): matching urban design and urban ecology. *Landscape Review*, 2008, v. 12, no. 2, pp. 61–73.
- [22] Alekseychuk Ya.D., Kerimova N.A. *Sovremennye napravleniya ozeleneniya obshchestvennykh inter'ero*v [Modern trends in landscaping public interiors]. *Landshaftnaya arkhitektura, stroitel'stvo i obrabotka drevesiny: mater. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii SPbGLTU po itogam NIR 2017 goda ILASiOD* [Landscape architecture, construction and wood processing: materials of the scientific and technical conference of SPbGLTU on the results of R&D in 2017, ILASiOD], St. Petersburg, February 15–16, 2018. Ed I.A. Melnichuk. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2018, pp. 72–74.
- [23] Klimanova O.A., Kolbovskiy E.Yu., Illarionova O.A. *Ekologicheskiy karkas krupneyshikh gorodov Rossiyskoy Federatsii: sovremennaya struktura, territorial'noe planirovanie i problemy razvitiya* [Ecological framework of the largest cities of the Russian Federation: modern structure, territorial planning and development problems]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle* [Bulletin of St. Petersburg University: Earth Science], 2018, v. 63, no. 2, pp. 127–146.
- [24] Morozova G.Yu., Debelaya I.D. *Analiz problem ozeleneniya sovremennogo goroda (na primere Khabarovska)* [Analysis of the problems of greening a modern city (using the example of Khabarovsk)]. *Vestnik DVO RAN* [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences], 2018, no. 4, pp. 38–48.
- [25] Kalmanova V.B. *Analiz formirovaniya zelenogo karkasa v planirovochnoy strukture g. Birobidzhana* [Analysis of the problems of greening a modern city (using the example of Khabarovsk)]. *Regional'nye problemy* [Regional issues], 2019, v. 22, no. 3, pp. 70–77.
- [26] *Ekosistemnye uslugi Rossii: Prototip natsional'nogo doklada. T. 3. Zelenaya infrastruktura i ekosistemnye uslugi krupneyshikh gorodov Rossii* [Ecosystem services in Russia: Prototype of the national report. Vol. 3. Green infrastructure and ecosystem services of Russia's largest cities]. Moscow: Izd-vo Tsentra okhrany dikoy prirody [Publishing House of the Wildlife Conservation Center], 2021, 112 p.
- [27] Makarenko V.P., Fetisov D.M., Zhuchkov D.V. *Izuchenie rastitel'nogo pokrova malyykh i srednikh gorodov Rossii: sovremennoe sostoyanie* [Study of vegetation cover of small and medium-sized cities in Russia: current state]. *Regional'nye problemy* [Regional problems], 2022, v. 25, no. 1, pp. 3–15.
- [28] Glazunov V.A., Tret'yakova A.S., Chizhov E.A. *Floristicheskoe raznoobrazie sovremennogo ekologicheskogo karkasa g. Tyumeni* [Floristic diversity of the modern ecological framework of Tyumen]. *Biosfera* [Biosphere], 2023, v. 15, no. 4, pp. 335–342.
- [29] Shikhova N. S. Functional Efficiency of the Woody Vegetation Species Composition in Urban Green Spaces. *Russian J. of Ecology*, 2023, v. 54, no. 6, pp. 693–703.
- [30] Lu Y., Coops N. C., Hermosilla T. Estimating urban vegetation fraction across 25 cities in pan-Pacific using Landsat time series data. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, v. 126, pp. 11–24.
- [31] Kravchuk L.A., Yanovskiy A.A., Bazhenova N.M., Pats A.Ch. *Differentsirovannaya otsenka zelenoy infrastruktury g. Minska s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Differentiated assessment of the green infrastructure of Minsk using Earth remote sensing data]. *Prirodopol'zovanie* [Environmental management], 2019, no. 2, pp. 152–167.
- [32] Fetisov D.M., Zhuchkov D.V., Goryukhin M.V. *Otsenka urovnya ozeleneniya goroda Birobidzhana s primeneniem mul'tispektral'nykh dannykh* [Assessment of the greening level of the city of Birobidzhan using multispectral data]. *Biosfera* [The Biosphere], 2023, v. 15, no. 4, pp. 335–342.

- [33] Abutaleb K., Mudede M.F., Nkongolo N., Newete S.W. Estimating urban greenness index using remote sensing data: A case study of an affluent vs poor suburbs in the city of Johannesburg. *The Egyptian J. of Remote Sensing and Space Sciences*, 2021, v. 24, pp. 343–351.
- [34] Khuzhakhmetova A.Sh., Voronina V.P., Lazarev S.E. *Otsenka prostranstvennoy struktury drevessno-kustarnikovykh nasazhdeniy goroda Volgograda po dannym mul'tispektral'nykh kosmicheskikh snimkov* [Assessment of the spatial structure of tree and shrub plantings in the city of Volgograd based on multispectral satellite images]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Izvestia of the Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex: Science and higher professional education], 2022, no. 3(67), pp. 218–232.
- [35] Zhuchkov D.V., Fetisov D.M. *Otsenka sovremennogo sostoyaniya rastitel'nogo pokrova g. Obluch'e po mul'tispektral'nym dannym* [Distribution of the NDVI vegetation index in the territory of Gomel]. *Regional'nye problemy* [Regional problems], 2024, no. 3(144), pp. 52–55.
- [36] Sokolov A.S. *Raspredelenie vegetatsionnogo indeksa NDVI na territorii Gomelya* [Assessment of the current state of vegetation cover in the city of Obluchye based on multispectral data]. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta im. F. Skoriny* [Proceedings of Gomel State University named after F. Skorina], 2024, v. 27, no. 1, pp. 112–124.
- [37] Ceballos-Silva A., López-Blanco J. Delineation of suitable areas for crops using a Multi Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico. *Agricultural Systems*, 2003, v. 77(2), pp. 117–136.
- [38] Anitha V., Prabha D. Role of NDVI in Assessing Surface Urban Heat Island phenomenon: A Case Study of Alappuzha District, Kerala. *J. of Materials and Environmental Science*, 2024, v. 15(9), pp. 1331–1346.
- [39] Hashim H., Abd Latif Z., Adnan N.A. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) pleiades imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, v. XLII-4/W16, pp. 237–240.
- [40] Aryal J., Sitaula C., Aryal S. NDVI Threshold-Based Urban Green Space Mapping from Sentinel-2A at the Local Governmental Area (LGA) Level of Victoria, Australia. *Land*, 2022, v. 11(3), p. 351.
- [41] Lee G., Kim G., Min G., Kim M., Jung S., Hwang J., Cho S. Vegetation Classification in Urban Areas by Combining UAV-Based NDVI and Thermal Infrared Image. *Applied Sciences*, 2023, v. 13(1), p. 515.
- [42] Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, v. 16, pp. 9563–9577.
- [43] Kandel S., Gyawali B., Sandifer J., Shrestha S., Upadhaya S. Assessment of Urban Heat Islands (UHIs) Using Satellite-Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Land Surface Temperature (LST) in Three Metropolitan Cities of Nepal. *Banko Janakari*, 2022, v. 32, no. 2, pp. 37–51.
- [44] Guseynov A.N. *Ekologiya goroda Tyumeni: sostoyanie, problemy* [Ecology of the city of Tyumen: state, problems]. Tyumen': Slovo, 2001, 176 p.
- [45] Starkov V.G., Tyul'kova L.A. *Geologicheskaya istoriya i mineral'nye bogatstva Tyumenskoy zemli* [Geological history and mineral resources of the Tyumen land]. Tyumen': IPP «Tyumen'», 1996, 192 p.
- [46] Tyumen' nachala XXI veka [Tyumen at the beginning of the 21st century]. Tyumen': Izd-vo IPOS SO RAN, 2002, 335 p.
- [47] Glazunov V.A., Khozyainova N.V., Khozyainova E.Yu. *Flora goroda Tyumeni* [Flora of the city of Tyumen]. *Fitoraznoobrazie Vostochnoy Evropy* [Phytodiversity of Eastern Europe], 2020, v. XIV, no. 4, pp. 420–497.
- [48] Copernicus Browser. Available at: <https://606.su/cvxR>. (accessed 01.08.2024).
- [49] Kuc G., Chormański J. Sentinel-2 imagery for mapping and monitoring imperviousness in urban areas. *Int. Arch. Photogrammetry Remote Sens. Spatial Informat Sci*, 2019, (XLII-1/W2), pp. 43–47.
- [50] Dissanayake D.M.S.L.B., Morimoto T., Ranagalage M., Murayama Y. Land-use/land-cover changes and their impact on surface urban heat islands: Case study of Kandy City, Sri Lanka. *Climate*, 2019, v. 7(8), p. 99.
- [51] Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 1979, v. 8(2), pp. 127–150.
- [52] Townshend J.R., Justice C.O. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *International J. of remote sensing*, 1986, v. 7(11), pp. 1435–1445.
- [53] *Prilozhenie 1 k Postanovleniyu Administratsii goroda Tyumeni ot 30.09.2024 № 151-pk «O vnesenii izmeneniy v postanovlenie Administratsii goroda Tyumeni ot 28.06.2021 № 124-pk»* [Appendix 1 to the Resolution of the Tyumen City Administration dated 30.09.2024 No. 151-pc «On Amendments to the Resolution of the Tyumen City Administration dated 28.06.2021 No. 124-pc»]. *Administratsiya goroda Tyumeni*. Available at: <https://www.tyumen-city.ru/> (accessed 30.08.2024).
- [54] Carpio M., González Á., González M., Verichev K. Influence of pavements on the urban heat island phenomenon: A scientific evolution analysis. *Energy and Buildings*, 2020, v. 226, p. 110379.
- [55] Bannikova L.A., Khrichenkov A.V., Burtsev A.G., Tiganova I.A., Tretyakova A.S., Grudanov N.Yu., Vladykina V.D. *Printsipy formirovaniya podkhoda k blagoustroystvu ozelenennykh prostranstv Ekaterinburga* [Modern foundations for green areas formation in Ekaterinburg]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 6, pp. 106–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-106-113

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute for Comprehensive Analysis of Regional Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, topic No. 1021062311241-6-1.6.20; 1.6.22; 1.6.15; 1.15.12 (FWUG2024-0005); the Institute of Northern Development Problems of the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, topic No. 1025031300145-5-1.5.1 (FWRZ-2026-0022); the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, topic No. 123112700111-4. The work was carried out with the support of Brusnika LLC within the framework of the R & D activity line «Sustainable Landscape. Expanded Possibilities of Greening».

Authors' information

Zhuchkov Dmitriy Vital'evich ✉ — a Junior Researcher at the Institute for Complex Analysis of Regional Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, dmitry.zhuchkov.2000@mail.ru

Glazunov Valeriy Aleksandrovich — Cand. Sci. (Biology). Senior Researcher at the Tyumen Scientific Center SB RAS, v_gl@inbox.ru

Tret'yakova Alena Sergeevna — Dr. Sci. (Biology), Director of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, as.tretyakova1@yandex.ru

Fetisov Denis Mikhaylovich — Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Director of Institute for Complex Analysis of Regional Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, dmf.mail@yandex.ru

Burtsev Aleksandr Gennad'evich — Head of the Scientific Research Department of the R&D Department of LLC «Brysnika», a.burtsev@brusnika.ru

Khrichenkov Aleksey Vladimirovich — Head of the The R&D Department of LLC «Brysnika», khrichenkov@brusnika.ru

Received 20.03.2025.

Approved after review 06.05.2025.

Accepted for publication 28.11.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest