

О. А. Саид Кассаб. Метод топологического анализа неорганизованных жилых городских застроек // Современная архитектура мира. Вып. 21 [2/2023]. С. 239–258

O. A. Said Kassab. Method of topological analysis of unorganized residential urban developments // Contemporary World's Architecture. Vol. 21 [2/2023]. Pp. 239–258

Научная статья

УДК 721

doi: 10.25995/NIITIAG.2023.21.2.011

# МЕТОД ТОПОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НЕОРГАНИЗОВАННЫХ ЖИЛЫХ ГОРОДСКИХ ЗАСТРОЕК

Омар Ахмад Саид Кассаб

Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия, arch.o.k@mail.ru

**Аннотация.** Мир быстро урбанизируется: в настоящее время в городах проживает почти 4 миллиарда человек, из них около 1 миллиарда — в трущобах. В условиях стремительной урбанизации достижение целей устойчивого развития во многом зависит от решения проблем городских трущоб — территорий неорганизованных жилых застроек.

В статье показано, что одну из центральных проблем трущоб — отсутствие пространственных доступов к городской инфраструктуре жизнеобеспечения — можно не только диагностировать, используя топологический анализ карт трущобных районов, но и решать ее поэтапно путем последовательных шагов оптимизации.

Застроенная среда города, подверженного стихийным процессам распространения трущоб, делится на два типа сетевых пространств: места, обладающие универсальными топологическими характеристиками, встречающимися в большинстве организованных кварталов развитых городов, и районы неформальных застроек (трущоб), относящиеся к иному топологическому классу.

В статье продемонстрировано, что метод топологического анализа способен подсказать оптимальные решения организации уличной сети трущобных кварталов, которое обеспечит универсальный доступ к инфраструктуре города с минимальными затратами и нарушениями сложившейся структуры застройки. Заметное улучшение конечных результатов использования топологического метода дает параллельное проведение социологических опросов, дающих представление о предпочтениях местных жителей.

В настоящее время подобная практика применяется в районах Кейптауна (Южная Африка) и Мумбаи (Индия), демонстрируя практическую эффективность сочетания современных вычислительных методов диагностики с интересами местных сообществ и органов власти.

**Ключевые слова:** трущобы, топологический алгоритм, городское планирование, сетевая инфраструктура жизнеобеспечения

*Original article*

## METHOD OF TOPOLOGICAL ANALYSIS OF UNORGANIZED RESIDENTIAL URBAN DEVELOPMENTS

Omar Ahmad Said Kassab

Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia, arch.o.k@mail.ru

**Abstract.** The world is rapidly urbanizing: currently, almost 4 billion people live in cities, of which about 1 billion live in slums. In conditions of rapid urbanization, the achievement of sustainable development goals largely depends on solving the problems of urban slums — territories of unorganized residential developments.

The article shows that one of the central problems of slums — the lack of spatial access to the urban infrastructure of life support, can not only be diagnosed using topological analysis of slum areas, but also to solve it in stages by successive optimization steps.

The built-up environment of a city subject to spontaneous processes of slum proliferation is divided into two types of network spaces: places with universal topological characteristics found in most organized neighborhoods of developed cities, and areas of informal developments (slums) belonging to a different topological class.

The article demonstrates that the method of topological analysis is able to suggest optimal solutions for the organization of a street network of slum quarters, which will provide universal access to the infrastructure of the city with minimal costs and violations of the existing building structure. A noticeable improvement in the final results of using the topological method is provided by the parallel conduct of sociological surveys that give an idea of the preferences of local residents.

Currently, similar practices are being used in the Cape Town (South Africa) and Mumbai (India) regions, demonstrating the practical effectiveness of the combination

**Keywords:** slums (informal settlements), topological algorithm, urban planning, life support network infrastructure

## ВВЕДЕНИЕ

По оценкам ООН-Хабитат, к 2050 г. 6,4 миллиарда человек будет жить в городах, из них 3 миллиарда может оказаться в трущобах, если не будут приняты практические действия для решения этой проблемы<sup>1</sup>. Недавние международные соглашения, такие как «Цели в области устойчивого развития (Sustainable Development Goals)» и «Новая программа развития городов (The New Urban Agenda)» призывают к преобразованию территорий неорганизованной застройки в официально обслуживаемые районы, соответствующие установленным нормам и принципам<sup>2</sup>, учитывающим местные приоритеты. Благодаря этим двум программам были сделаны значительные инвестиции в учет трущоб, их благоустройство и развитие<sup>3</sup>. Создание «городов без трущоб» ориентировано на реализацию трендов устойчивого развития в условиях урбанизации.

Трущобы обычно ассоциируются с серьезными экологическими проблемами<sup>4</sup> и многими видами социальной и экономической изоляции, которые мешают людям и городам реализовать свой потенциал в области человеческого развития и экономического роста<sup>5</sup>. В данной работе будет сделан акцент на главной проблеме спонтанной,

## ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>1</sup> United Nations Human Settlements Program, *The Slum Problem: Global Report on Human Settlements, 2003* (Earthscan Publications, 2003).

<sup>2</sup> Coburn J., Karanja I. *Informal settlements and attitudes to healthcare in Nairobi, Kenya: sanitation, gender and dignity. Health Promotion. Int.* 31, 258–269 (2014).

<sup>3</sup> Салмина О. Е., Быстрова Т. Ю. Принципы создания устойчивой архитектуры // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2015. № 4. С. 36–40. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsiipy-szodaniyaustoychivoy-arhitektury/viewer>.

<sup>4</sup> Мердасса Ф. Т. Пространственные и структурные особенности неформальных поселений в городах развивающихся стран // Наука и образование сегодня. 2020. № 12 (59). С. 108–111. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennyye-i-strukturnyye-osobennosti-neformalnyh-poseleniy-v-gorodah-razvivayuschihya-stran/viewer>.

<sup>5</sup> Чернышев С. А. Социально-психологическая деформация диффузных групп и их реабилитация в кризисном обществе : автореф. дис. ... д-ра психол. наук. Ярославль, 1999.

<sup>6</sup> Баранов Д. Н., Романченко О. В. Тенденции развития процесса урбанизации в мире с прогнозом до 2050 года // Инновационное развитие общества: условия, противоречия, приоритеты: материалы X международной научной конференции: в 3-х частях. Москва, 27 марта 2014 г. Часть 2. М.: Московский университет им. С. Ю. Витте, 2014. С. 263–273.

<sup>7</sup> Sklar E. D., Garou P., Karolyn G., *The problem of slum health and cities of the 21st century. Lancet* 365, 901–903 (2005).

<sup>8</sup> Mani A., Mullainathan S., Shafir E., Zhao J., *Poverty hinders cognitive functions. Science* 341, 976–980 (2013).

<sup>9</sup> Rees J. A. *How the Other Half Lives* (Seven Treasures Publications, 2009).

<sup>10</sup> Kostov S., Tobias R. *The City in Form: Urban Models and Meanings through History* (Little, Brown and Co., 1999).

<sup>11</sup> Schirmer P. M., Axhausen K. V. *Multiscale classification of urban morphology. J. Transp. Land use* 9, 101–130 (2015).

несанкционированной застройки. Это проблема доступа сетевых городских служб к жилым домам и отсутствие инженерных коммуникаций.

Трущобы, как правило, характеризуются неформальным или незапланированным землепользованием. Это часто приводит к отсутствию связи мест работы и проживания с инфраструктурой и услугами<sup>6</sup>. Хотя на практике всегда существует некоторый доступ для личного передвижения, многие места в трущобах не имеют адреса, до них невозможно добраться на транспортном средстве. Это создает проблемы с медицинской помощью и противопожарной защитой в экстренных случаях, ведет к отсутствию водоснабжения и санитарии. В совокупности все это ухудшает состояние окружающей среды и усиливает гуманитарные кризисы<sup>7</sup>.

Чтобы понять характер структуры трущоб, необходимо рассмотреть их в контексте других городских районов<sup>8</sup>. Города существуют в самых разных геометрических формах, от строгих сеток до планировок с извилистым лабиринтом улиц и переулков. Исторически геометрия городской планировки формируется как ограничениями, применимыми ко всем городам, такими как циркуляция людей, товаров и информации, так и процессами, специфичными для каждого места. Это география, ландшафт и климат, технологический и социальный контексты, в которых строится город, и история выбора, сделанного людьми<sup>9</sup>.

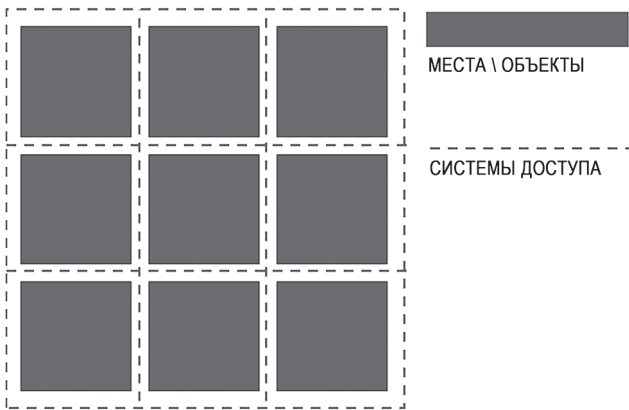
Разнообразие геометрических городских форм часто эстетически привлекательно, но не поддается количественному объяснению или воспроизведению известными методами проектирования<sup>10</sup>. Долгая история городского планирования и городской географии, а в последнее время и статистического анализа, основанного на данных, позволила классифицировать городские пространственные структуры с ориентацией на оптимальное проектирование, но поиски идеальных форм оставались неуловимыми<sup>11</sup>.

В статье показано, что топология, а не геометрия, способна описать сущностную

пространственную форму городов. Топология обеспечивает общую количественную меру свойств поверхностей и средства для установления эквивалентности между различными геометриями, притом что они могут непрерывно трансформироваться друг в друга. Следовательно, топологическая инвариантность допускает значительную свободу геометрической формы до тех пор, пока сохраняются существенные функциональные взаимосвязи. Применительно к городам эта методология позволяет описать связность как одну из важнейших пространственных взаимосвязей между уличными или инженерными сетями, зданиями и общественными местами. Описание городской формы с топологической точки зрения позволяет использовать аналитические инструменты для выявления зарождающегося городского развития в неформальных районах и выработки предложений по эффективным способам устранения дефицита инфраструктуры и услуг.

### ПРИНЦИП ТОПОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГОРОДОВ

Общая топология городов тесно связана с развитием микрорайонов. Городские застроенные пространства делятся на две категории: первая — системы доступа (то есть дороги, улицы и тропинки), вторая — система места (здания и общественные пространства). Эти два типа



### ИЛЛЮСТРАЦИИ

1. Схема компонентов города.  
Источник: разработка автора

### ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>12</sup> Abico A., de Azevedo Cardoso L. R., Rinaldelli R., Haha H. K. R. The main costs of slum upgrading in Brazil. *Urban development* (2007).

<sup>13</sup> Batty M. *The New Science of Cities* (MIT Press, 2013).

<sup>14</sup> Vera J. *Public Federations and Urban Improvement: The work of Pamoja Trust and Muungano in Kenya. Environment. Urban.* 16, 47–62 (2004).

<sup>15</sup> Характеристика Эйлера — это топологический инвариант, число, которое описывает форму или структуру топологического пространства независимо от того, как оно изогнуто. Обычно она обозначается формулой  $\chi = B - P + G$ , где  $B$ ,  $P$  и  $G$  — числа его вершин, ребер и граней.

физических пространств охватывают весь город и взаимосвязаны<sup>12</sup> (илл. 1).

Используя системы доступа и места, можно описать каждый город как связанный набор блоков, каждый из которых представляет собой остров, окруженный инфраструктурой, которая, в идеале, обеспечивает доступ к любому месту внутри него. Система доступа и места устанавливает, что городские трущобы подразделяются на топологические классы, отличные от развитых районов, поскольку доступ к инфраструктуре внутри них только зарождается, а во многих случаях и вовсе отсутствует. Топологический метод позволяет решить проблему доступа математически, путем нахождения путей физического преобразования улиц и подъездов в трущобах, изменяющих топологию района с минимальными затратами. Эта стратегия обеспечивает строгий и всеобъемлющий подход к фундаментальным свойствам городского планирования в любом месте.

С точки зрения сетевого анализа уличных сетей общая топология системы доступа в любом городе относительно проста<sup>13</sup> — физический объем всех путей, улиц и дорог в городе представляет собой связанную двумерную поверхность: в любую точку на этой поверхности можно попасть из любой другой точки на той же поверхности. Эта поверхность заканчивается там, где начинаются здания, и на внешних границах города. Таким образом, поверхность городской сети доступа « $U$ » любого города имеет ряд внутренних границ « $b$ », по одной для каждого городского квартала и еще одну для городских границ<sup>14</sup>.

Математически такая система доступа топологически эквивалентна диску с  $b$ -проколами или «дырками» (или сфере с  $b + 1$  удаленными дисками). Таким образом, все городские системы доступа с одинаковым количеством « $b$ » городских кварталов топологически эквивалентны. Они имеют общее инвариантное число и характеристику Эйлера (в математике, более конкретно, в алгебраической топологии и многогранной комбинаторике)<sup>15</sup>. Эйлерова характеристика  $\chi(U)$  обеспечивает универсальную пространственную меру размера города, а также является основой для соотнесения топологии различных городов между собой. Города с одинаковой  $\chi(U)$ , т.е. функционально эквивалентные города, существуют в самых разных формах, и при необходимости их геометрическая форма может трансформироваться.

## ТОПОЛОГИЯ СЕТЕЙ ДОСТУПА (ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ) И МЕСТ (ОБЪЕКТОВ)

Топология сетей доступа (дорожной инфраструктуры) и мест (объектов) тесно взаимосвязана, но часто рассматривается отдельно, хотя та и другая включают однородные объекты. Топология городских систем доступа

относится к общему расположению и структуре транспортных сетей в городских районах. Эти системы разработаны таким образом, чтобы обеспечить эффективные и доступные варианты транспортировки для жителей и гостей города, позволяя им легко передвигаться внутри города и по его окрестностям. Топология охватывает различные виды транспортных сетей, такие как дороги, общественный транспорт, пешеходные и велосипедные дорожки, образующие комплексную сеть. Вот некоторые ключевые элементы топологии городских систем доступа<sup>16</sup>.

Несмотря на то, что модернизация трасс находится в зачаточном состоянии, можно предположить, что по мере развития они будут включать в себя все необходимые элементы системы сетей доступа, поэтому необходимо их планировать<sup>17</sup>.

**Дорожная сеть.** Дорожная сеть формирует основу городских систем доступа, состоящих из улиц, проспектов, магистралей и различных типов дорог. Эти дороги предназначены для различных типов движения, включая автомобили, автобусы, мотоциклы и велосипеды.

**Общественный транспорт.** В городских районах часто есть системы общественного транспорта, такого как автобусы, трамваи, метро и легкий рельсовый транспорт. Эти транзитные линии стратегически спланированы таким образом, чтобы охватывать основные жилые и коммерческие районы, обеспечивая удобный доступ к различным пунктам назначения.

**Пешеходные дорожки.** Пешеходные дорожки соединяют ключевые места в системе доступа, такие как парки, торговые заведения и общественные учреждения. Они предназначены только для пешеходов, изолируют от встречи с транспортом и стимулируют пешую ходьбу.

**Велосипедные дорожки.** В городах, благоприятствующих велосипедному движению, выделенные велодорожки интегрированы в городскую топологию. Это поощряет устойчивые варианты транспортировки и позволяет велосипедистам безопасно передвигаться по городу.

## ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>16</sup> Jiang B., Klaramunt S., 2004. "Topological analysis of urban street networks" *Environment and Planning in: Planning and Design* 31: 151–162.

<sup>17</sup> Porta S., Krasiii P., Latora V. *Network analysis of city streets: a dual approach. Physics A* 369, 853–866 (2006).

<sup>18</sup> Jiang B., Zhao S., Yin J., 2008 "Self-organizing natural roads for predicting traffic flow: a sensitivity study" *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* July, p. 07008.

*Транспортные узлы.* Городские системы доступа часто включают транспортные узлы, такие как центральные железнодорожные вокзалы и автобусные терминалы, где пересекаются несколько транзитных маршрутов. Транспортные узлы облегчают пересадки между различными видами транспорта.

*Системы управления дорожным движением.* Передовые системы управления дорожным движением, включая светофоры, камеры и интеллектуальную сигнализацию, внедрены для оптимизации транспортного потока и уменьшения заторов в городской системе доступа.

*Зонирование и землепользование.* Топология городского доступа тесно связана с зонированием и планированием землепользования. Города, как правило, зонированы на районы (жилые, коммерческие, промышленные), что позволяет контролировать застройку и обеспечивать эффективный доступ к различным типам мест назначения.

*Интеллектуальные транспортные системы.* Некоторые города внедряют технологии ИТС, такие как информационные системы реального времени и интеллектуальные навигационные инструменты, чтобы предоставлять путешественникам актуальную информацию об условиях дорожного движения и расписании общественного транспорта.

*Инклюзивность* (от inclusion — включение). Важным аспектом городской топологии доступа является обеспечение процесса включения людей с физической и ментальной инвалидностью в полноценную общественную жизнь, а также разработку и принятие конкретных решений для этого (пандусы, лифты и тактильное покрытие).

*Городское планирование и рост.* Топология городской системы доступа эволюционирует по мере роста города и изменений в структуре населения. Усилия по городскому планированию помогают адаптировать транспортную сеть к текущим и будущим требованиям.

Что касается *системы топологии мест*, то она относится к пространственному расположению не только объектов, но и мест общественного пользования городской среды, играя решающую роль в формировании функциональности, связности и характера города. Она включает в себя организацию улиц, кварталов, микрорайонов, общественных пространств и других элементов, составляющих городскую структуру. Вот, например, некоторые ключевые аспекты топологии городских объектов<sup>18</sup>.

*Зонирование землепользования.* Зонирование городских районов обычно соответствует их назначению, различаются жилые, коммерческие, промышленные, рекреационные и институциональные районы. Их пространственное распределение влияет на сочетание видов деятельности жителей города и различные формы их взаимодействия.

*Жилые районы.* Расположение жилых кварталов и типов жилья вносит свой вклад в общий характер города и социальную динамику. Городская

топология может включать в себя различные варианты жилья, такие как дома на одну семью, квартиры, таунхаусы и многофункциональные комплексы.

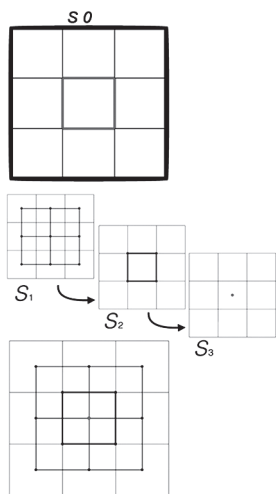
**Коммерческие районы.** Центральные деловые районы, торговые центры и коммерческие коридоры являются неотъемлемыми частями городской топологии. Эти районы предназначены для размещения предприятий, торговых площадей и сферы услуг, привлекая как жителей района, так и гостей.

**Общественные пространства.** Парки, площади, скверы и другие общественные пространства являются важными компонентами городской топологии. Они обеспечивают зоны для отдыха, общественных собраний и культурных мероприятий, повышая качество жизни городских жителей.

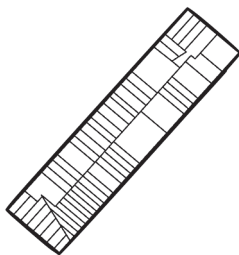
**Транспортные узлы.** Транспортные узлы представлены железнодорожными вокзалами, автобусными терминалами и аэропортами, которые служат ключевыми узлами для региональных и международных передвижений. В современной практике все чаще встречаются комплексные, многопрофильные транспортные узлы.

**Зеленые насаждения.** Городская топология включает зеленые насаждения и природные объекты,

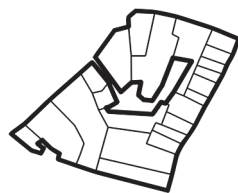
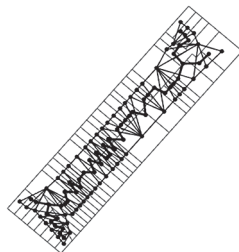
2. Топология населенных пунктов и городских кварталов. Источник: С. Брелсфорд, Т. Мартин, Дж. Хэнд, Л. М. А. Беттенкурт. На пути к городам без трущоб: топология и пространственная эволюция окрестностей. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018)



А- СХЕМА ГОРОДСКОГО КВАРТАЛА



Б- ГОРОДСКОЙ КВАРТАЛ В НЬЮ-ЙОРКЕ



В- ГОРОДСКОЙ КВАРТАЛ В ПРАГЕ



такие как городские парки, зеленые пояса и набережные, которые способствуют экологической устойчивости и улучшают городскую эстетику.

*Исторические и культурные районы.* Объекты культурно-исторического наследия придают городской топологии индивидуальный характер, сохраняя самобытность города и конкретного места.

*Многофункциональная застройка.* Городская топология все чаще включает в себя многофункциональные застройки, которые сочетают жилые, коммерческие и рекреационные функции в пределах одного района. Этот подход направлен на создание удобных для прогулок, оживленных кварталов.

*Пешеходная и велосипедная инфраструктура.* Топология городских объектов может включать удобные для пешеходов дорожки, велосипедные дорожки и станции обмена велосипедами, способствуя развитию устойчивых видов транспорта и уменьшая зависимость от автомобилей.

*Плотность и высота застройки.* Плотность застройки и высота зданий формируют линию горизонта, силуэт города и его общий визуальный характер. Степень плотности застройки, а также расположение высотных зданий и малоэтажных сооружений должны быть продиктованы социальным заказом, географическим положением и градостроительными традициями места.

*Инфраструктура и инженерные сети.* Городская топология включает в себя проектирование и распределение инфраструктурных систем, таких как водоснабжение, канализация, электричество и телекоммуникации, поддерживающих функционирование города. Топология объектов зависит от их пространственной организации относительно сетей доступа, а также расположения относительно друг друга, что требует детального изучения для общего понимания возможностей землепользования в неорганизованных районах.

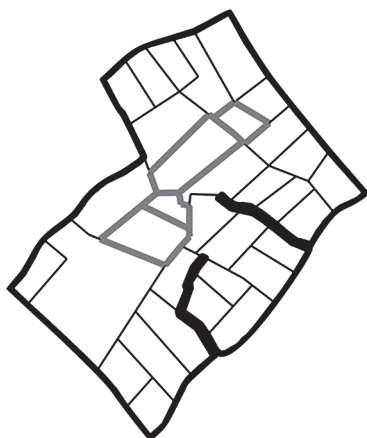
Рассмотрим примеры городских кварталов, относящихся к трем различным континентам (илл. 2). На схеме 2А показаны условно городской квартал и построение графика, используемого для определения мест, не подключенных к окружающей дорожной инфраструктуре.

На схеме 2Б изображены типичные городские кварталы Нью-Йорка, отстроенные в 2014 г., и график определения доступа к объектам внутри квартала. На схеме 2В кварталы Праги, история которых берет свое начало в 1840 г. Несмотря на значительный временной промежуток и очевидную разницу в геометрической форме застройки, на схемах обоих городов видно, что объекты примыкают непосредственно к дорожным полотнам. Для каждого объекта, предназначенного для жилья или любой другой деятельности, есть доступ, который, в свою очередь, соединяет его внутренние помещения с улицами соседних кварталов, а оттуда — с любым другим местом в самом городе.

Примыкание каждого объекта к участку уличной сети является общим свойством организованных городских пространств. Если каждое место в пределах квартала примыкает к системе доступа, мы называем соответствующий городской квартал универсально доступным, что говорит о возможности добраться до всех объектов внутри него.

К каждому «доступному» объекту есть дорожка, улица или часть улицы, выделенная исключительно для него. Этот результат определяет общую топологию городов при условии, что все их места доступны. Также характеристика Эйлера, рассмотренная выше, дает топологическую (не зависящую от геометрии) количественную меру размера города и выражает общий тип «самоподобия» между городскими пространствами, когда участки одного города могут быть сопоставлены с целыми городами, при условии одинакового количества кварталов.

Однако для быстрорастущей стихийной застройки трущоб и других бедных или маргинальных районов типичной является недоступность объектов внутри городских кварталов. Для анализа данной проблемы производится расчет математического показателя —  $k_{max}$ , определяющего «сложность» блока, что позволяет измерить взаимосвязи городского квартала с самим городом.

A-  $k_{MAX}=3$ 

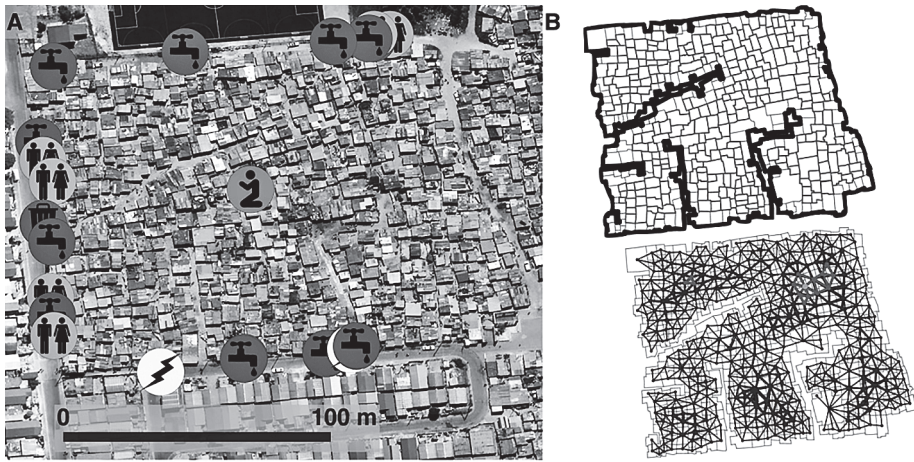
## ИЛЛЮСТРАЦИИ

3. Трущобный район в Хараре, Зимбабве. Источник: С. Брелсфорд, Т. Мартин, Дж. Хэнд, Л. М. А. Беттенкурт. На пути к городам без трущоб: топология и пространственная эволюция окрестностей. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018)

4. Трущобный район в Кейптауне, Южная Африка. Источник: С. Брелсфорд, Т. Мартин, Дж. Хэнд, Л. М. А. Беттенкурт. На пути к городам без трущоб: топология и пространственная эволюция окрестностей. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018)

## ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>19</sup> Brelsford C., Martin T., Hand J., Bettencourt L. M. A. Toward cities without slums: Topology and the special evolution of neighborhoods. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018).



Чем выше значение показателя, тем сложнее добраться до мест в пределах квартала, начиная с имеющейся уличной сети. Существует два эквивалентных способа вычисления сложности блока. Оба требуют представления объектов в каждом городском квартале в виде графика — ( $S_0$ ), где ребра соответствуют границам каждого участка, а узлы — их пересечению<sup>19</sup>.

На графике 2А схематически изображен квартал  $S_0$ , состоящий из девяти участков. Из иллюстрации видно, что центральный участок не обладает свободным доступом к инфраструктуре дорожных сетей. Вычисление сложности блока ( $k_{max}$ ) происходит путем соединения между собой центров всех блоков (фиолетовый цвет). Таким образом, возникает новое поколение участков —  $S_1$ , на котором мы можем выделить уже его собственные слабые, недоступные места. Построение новых поколений ( $S_2$ ,  $S_3$  и т. д.) через соединение центров образующихся участков продолжается до тех пор, пока «соединительная» линия не образует не пересекающуюся ни с чем больше прямую. А участки, через которые она пройдет, — итоговые слабые места, не имеющие свободного доступа. Иными словами, — число  $k_{max}$  равно числу поколений, которые необходимо «достроить» для выявления итоговых слабых участков. На основе этих данных алгоритм начинает предлагать схемы-решения построения к ним дорожных полотен.

Чтобы проиллюстрировать результаты, полученные описанным выше методом, рассмотрим небольшой квартал из неофициального поселения в Хараре, Зимбабве,  $k_{max}$  которого равен 3 (илл. 3).

Более сложный городской квартал расположен в Кейптауне, Южная Африка, с  $k_{max} = 9$  (илл. 4).

Эти примеры также показывают, что сложность квартала —  $k_{max}$  — имеет дополнительное количественное значение.

## БЛАГОУСТРОЙСТВО ТРУЦОБ С ПОМОЩЬЮ ОГРАНИЧЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Данный раздел представляет ответ на центральный вопрос данной статьи: поиск алгоритма математически обоснованных четких практических решений для городского развития, используя карты окрестностей и существующие подъездные пути. Главный вопрос, связанный с развитием микрорайона, заключается в том, как наиболее эффективно добиться наибольших позитивных изменений. Отчасти благодаря усилиям мировых влиятельных организаций тенденция на выселение или переселение из неблагоприятных районов, которая чаще всего не обеспечивает устойчивых решений, сменилась на идею модернизации и благоустройства. Данная практика известна как реорганизация. Технически реорганизация изменяет топологию района независимо от его конкретной геометрии, обеспечивая доступ к улицам и инфраструктуре в каждом месте и создавая общественные пространства. Повторная реорганизация — это операция, которая часто осуществляется сообществами неформальных поселений самостоятельно или совместно с местными органами власти<sup>20</sup>. Используется данная практика в качестве важнейшего первого шага для открытого развития микрорайона.

Обеспечение доступа к каждому участку и зданию по соседству является основным физическим фактором любой стратегии благоустройства трущоб<sup>21</sup>. Внедрение городских услуг и инфраструктуры ведет к постепенному процессу морфологического изменения микрорайона, которое в конечном итоге может привести к объединению небольших участков, а также к модернизации и к реконструкции некоторых зданий.

ООН-Хабитат в настоящее время рекомендует модернизацию уличной инфраструктуры в качестве основной стратегии развития микрорайонов, которая может значительно улучшить социально-экономические результаты. Затраты

### ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>20</sup> Mitlin D. C., Satterthwaite D. *Urban Poverty in the Global South: Scale and Nature* (Routledge, 2013).

<sup>21</sup> United Nations Human Settlements Program, *The Slum Problem: Global Report on Human Settlements, 2003* (Earthscan Publications, 2003).

<sup>22</sup> UN-Habitat, *Streets as tools for urban transformation in slums* (UN-Habitat, 2014).

<sup>23</sup> Brailsford K., Martin T., Hunt J., Bettencourt L. M. A. *On the way to cities without slums: Topology and spatial evolution of neighborhoods*. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018). August 29, 2018 of 8.

на предоставление услуг до и после реорганизации сильно различаются, часто в десять и более раз, что делает критической разницу между предоставлением услуги или непредоставлением. Это связано с тем, что городские трубопроводы, такие как системы водоснабжения, канализации и газоснабжения, гораздо проще проектировать, строить и обслуживать, когда их подъездной путь проходит по улицам и скрыт под ними.

Несмотря на все эти преимущества, процесс реорганизации часто протекает медленно, поскольку возможно множество различных конфигураций доступа, а принятие решения требует координации действий многочисленных заинтересованных сторон с различными компромиссами между затратами и выгодами<sup>22</sup>. Таким образом, процесс коллективного рассмотрения множества правдоподобных альтернатив, как правило, значительно задерживает принятие практических решений, если не исключает их вообще, особенно в тех случаях, когда группы местного сообщества не были эффективно задействованы.

По этим причинам необходимо создание строгих и простых в использовании инструментов планирования, которые быстро анализируют проблему доступа и выявляют эффективные решения. Чтобы решить эту проблему, приведенные выше примеры математических расчетов ( $k_{max}$ ) подсказывают, как алгоритмически построить оптимальную реорганизацию путем решения задачи ограниченной оптимизации, затрагивающей городской квартал, состоящий из улиц и участков, и предлагают добавить минимальный набор дополнительных доступов, которые сделают квартал универсально доступным.

Исходя из своего опыта в Южной Африке, группа специалистов предложила математический алгоритм, который способен вычислить  $k_{max}$  для выбранного городского квартала. Если  $k_{max} > 2$ , создается новый набор дорожной инфраструктуры, до тех пор, пока  $k_{max}$  не станет  $\leq 2$ . Алгоритм также минимизирует  $L(U)$ , сохраняя  $k_{max} \leq 2$ , где  $L(U)$  — общая длина дорожной инфраструктуры. Ограничение, заключающееся в минимизации  $L(U)$  при одновременном обеспечении универсальной связи, также обеспечивает минимальные перебои в работе и затраты на строительство<sup>23</sup>.

Примеры оптимальных конфигураций универсальной связи, полученные при абсолютной минимизации длины новой конструкции, показаны на илл. 5.

При использовании данного алгоритма наблюдалось, что новые сегменты инфраструктуры обычно выглядят как тупиковые улицы, поскольку минимальный набор ребер, необходимый для соединения набора узлов, всегда будет давать древовидный граф. Но данное решение не соответствует условиям некоторых трущобных районов в связи с их социологическими, экономическими, экологическими характеристиками.

## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТЕЙ ДОСТУПА

Данный раздел посвящен способам решения проблемы тупиковых дорожных полотен. Типичные конфигурации сетей доступа чаще всего обладают общими чертами минимального решения в виде наборов разветвляющихся тупиковых улиц и дорог. Сравнивая сети доступа в развитых районах, можно сделать вывод, что они нередко выглядят как разветвленная сеть<sup>24</sup>.

Обилие тупиков нетипично для большинства районов, поскольку это приводит к большим расстояниям по сети между местами, которые территориально расположены поблизости, а также потому, что это может вызвать заторы на въездах. С другой стороны, отклонение от геометрии ветвления для локальных доступов подразумевает, что по мере развития окрестностей создается больше доступов, чем минимально необходимо. Таким образом, эти приспособления не являются уникальными и зависят от характера и истории местного землепользования.

Для решения проблемы тупиков была разработана оптимизационная задача, направленная на сокращение затрат на поездки (таких как время

## ИЛЛЮСТРАЦИИ

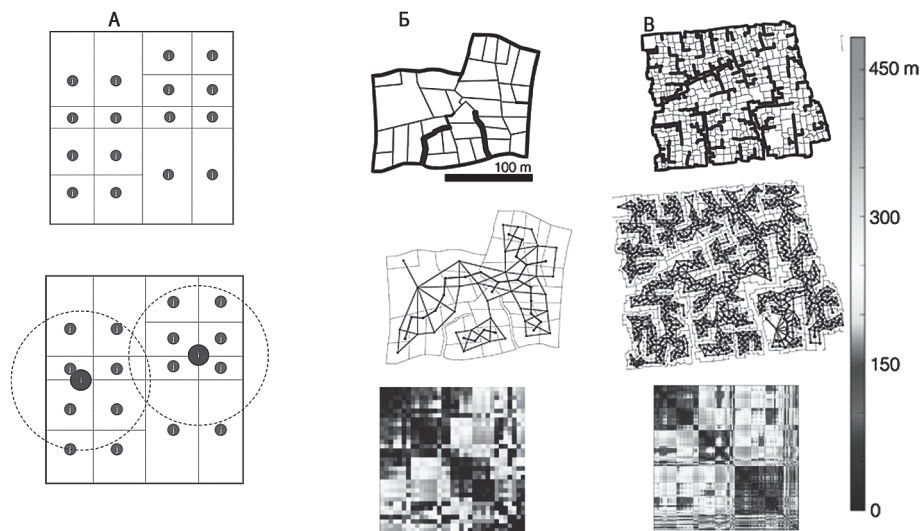
5. Примеры применение алгоритма на трущобных районах. Источник: С. Брелсфорд, Т. Мартин, Дж. Хэнд, Л. М. А. Беттенкурт, на пути к городам без трущоб: топология и пространственная эволюция окрестностей. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018)

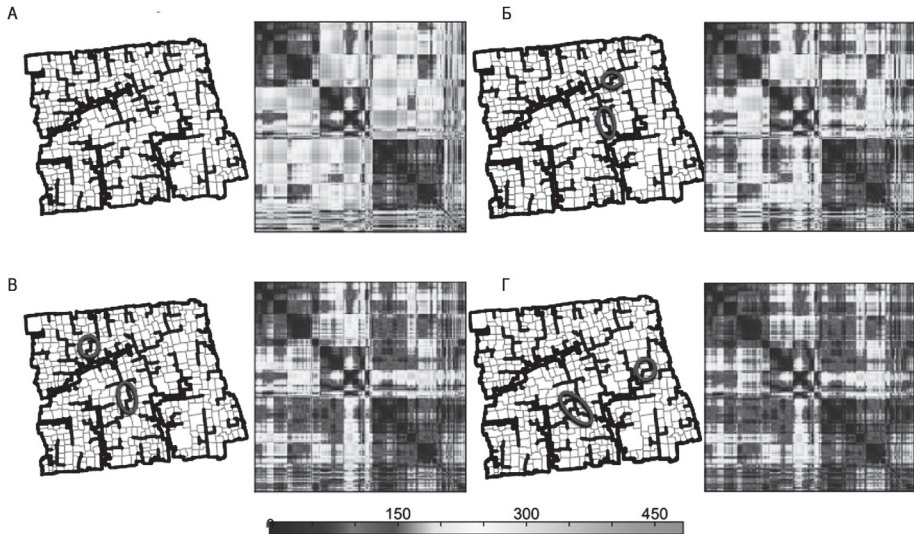
6. Этапы применение алгоритма соединения тупиков на примере города Кейптаун. Источник: С. Брелсфорд, Т. Мартин, Дж. Хэнд, Л. М. А. Беттенкурт. На пути к городам без трущоб: топология и пространственная эволюция окрестностей. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018)

## ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>24</sup> Alexander C. A city is not a tree. *Arch. Forum* 122, 58–62 (1965).

<sup>25</sup> Brailsford K., Martin T., Hunt J., Bettencourt L.M.A., On the way to cities without slums: Topology and spatial evolution of neighborhoods.





и энергия), которые возникают из-за большого количества тупиковых улиц между любыми двумя (уже доступными) местами.

Чтобы сделать это, определяется матрица  $\mathfrak{Z} = \{T_{ij}\}$ , где  $T_{ij}$  — минимальное расстояние перемещения между точками «i» и «j» по существующей сети доступа. Точки «i» и «j» в данной матрице устанавливаются в зависимости от поставленной перед алгоритмом задачи. Допустим, определить количество требуемых для условного квартала (как на схеме 5А) детских садов, притом что минимальное расстояние между дошкольным образовательным учреждением и домом по градостроительным нормам должно составлять не менее 500 м. Таким образом, выходит, что точка «i» (красная на схеме) представляет собой детский сад, а точка «j» (синяя), в свою очередь, составляет ряд окружающих объектов, красный пунктир — диаметр действия (минимальное расстояние).

Применяя математическую формулу ( $I^- = 1/n \cdot 2 \sum_{ij} n^{ij} T_{ij}$ ), предложенную специалистами, алгоритм определяет наилучшее месторасположение детского сада в квартале.

Что касается тупиковых районов, то в качестве переменного параметра будет выступать минимальное расстояние между объектами топологии. На схемах (5Б, 5В) показана блочная структура в записях « $T_{ij}$ », которая следует из существования тупиков после топологической оптимизации. Таким образом, транспортные расходы могут быть существенно снижены за счет предложения дополнительных путей, которые обычно делят квартал пополам вдоль примыкающих тупиков. Предельная выгода от внедрения дополнительной инфраструктуры для создания сквозных улиц велика, поскольку это может заметно сократить среднее расстояние в пути от места к месту<sup>25</sup>.

Постепенная трансформация дорожных систем со многими тупиками в новые кварталы качественно согласуется с исторической последовательностью застройки микрорайона (илл. 6, 7), так что формализованные здесь процессы обеспечивают целостный подход к эволюции локальной пространственной структуры городов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

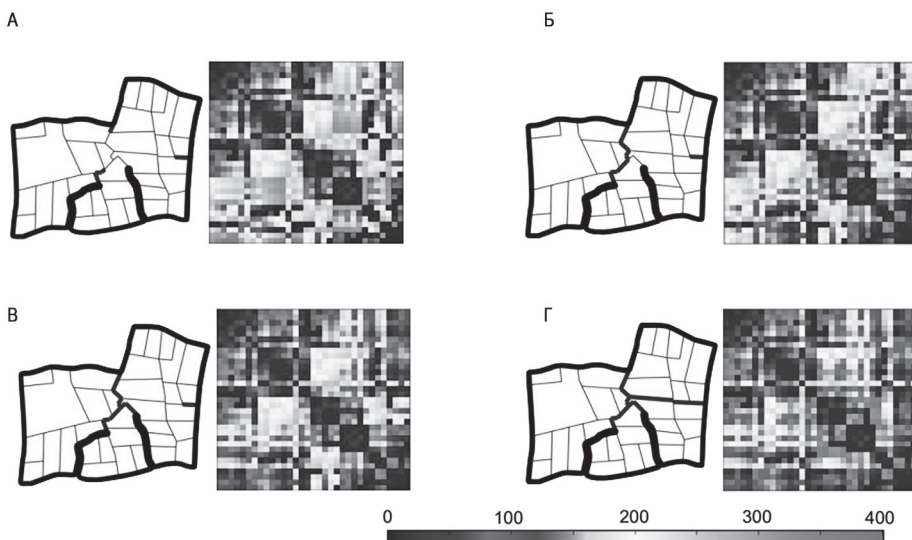
Несмотря на быстро растущее количество литературы по графическому анализу пространственных сетей, фундаментальные результаты для топологии всех городов пока не сформулированы. В статье приводятся общие аргументы в пользу этих результатов и математические доказательства, основанные на хорошо известных теоремах топологии.

Новизна использования метода топологического анализа городской застройки заключается в том, что демонстрируется, как инструменты топологии могут быть применены к реальным картам окрестностей не только для диагностики, но и для решения критических проблем городского развития. Предоставление бедным, неформальным районам адресов, доступа и услуг оказывает

7. Этапы применения алгоритма соединения тупиков на примере города Хараре. Источник: С. Брелсфорд, Т. Мартин, Дж. Хэнд, Л. М. А. Беттенкурт. На пути к городам без тупиков: топология и пространственная эволюция окрестностей. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018)

## ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>26</sup> Andavarapu D., Edelman D.J. The evolution of slum reconstruction policy. *Carr. City Garden.* 1, 185–192 (2013).





решающее воздействие на здоровье людей и экологическую устойчивость и становится платформой для социально-экономического развития. Применение вычислительных методов топологического анализа способствует диалогу между сообществами и их правительствами и благоприятствует совместному процессу городского планирования<sup>26</sup>.

Изложена основа для понимания общей топологии городов, которая позволяет математически измерить исключительность трущоб с помощью построения геометрического графика. Показано, как эта конструкция может быть реализована для анализа карты любого городского квартала и измерения отсутствия физического доступа. Когда подъездные пути отсутствуют, можно определить и предложить новые улицы и переулки, которые соединят все строения по соседству с существующей сетью инфраструктуры с минимальными затратами.

Представлена структура, характеризующая топологию городов: топология городских систем доступа в начале, затем — взаимосвязь между местами и доступами и, наконец, относительное положение между местами в пределах каждого городского квартала.

Важно отметить высокий потенциал рассмотренного метода для заметного ускорения процессов устойчивого развития в быстрорастущих городах, особенно в странах со средним и низким уровнем дохода. Существенна также масштабируемость метода — возможность его применения как для города в целом, так и для отдельных кварталов (характеристика Эйлера выражает общий тип самоподобия).

Метод топологического анализа городской застройки является универсальным для решения проблем доступа в городах и реализуется с помощью алгоритмов, позволяющих ранжировать, что является объективно необходимым, а что — частным и, следовательно, может быть оставлено на усмотрение местных решений.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баранов Д. Н., Романченко О. В. Тенденции развития процесса урбанизации в мире с прогнозом до 2050 года // Инновационное развитие общества: условия, противоречия, приоритеты: материалы X международной научной конференции: в 3-х частях. Москва, 27 марта 2014 г. Часть 2. М.: Московский университет им. С. Ю. Витте, 2014. С. 263–273.
2. Мердасса Ф. Т. Пространственные и структурные особенности неформальных поселений в городах развивающихся стран // Наука и образование сегодня. 2020. № 12 (59). С. 108–111. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennye-i-strukturnye-osobennosti-neformalnyh-poseleniy-v-gorodah-razvivayuschih-sya-stran/viewer>
3. Салмина О. Е., Быстрова Т. Ю. Принципы создания устойчивой архитектуры // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2015. № 4. С. 36–40. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/printsipy-sozdaniyaustoychivoy-arhitektury/viewer>

4. Чернышев С.А. Социально-психологическая деформация диффузных групп и их реабилитация в кризисном обществе : автореф. дис. ... д-ра психол. наук. Ярославль, 1999.
5. Abico A., de Azevedo Cardoso L.R., Rinaldelli R. Haha H.K. R., The main costs of slum upgrading in Brazil. *Urban development* (2007).
6. Alexander C. A city is not a tree. *Arch. Forum* 122, 58–62 (1965).
7. Andavarapu D., Edelman D.J. The evolution of slum reconstruction policy. *Carr. City Garden*. 1, 185–192 (2013).
8. Batty M. *The New Science of Cities* (MIT Press, 2013).
9. Brailsford K., Martin T., Hunt J., Bettencourt L.M.A. On the way to cities without slums: Topology and spatial evolution of neighborhoods. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018). August 29, 2018of8.
10. Breilsford C., Martin T., Hand J., Bettencourt L.M. A. Toward cities without slums: Topology and the special evolution of neighborhoods. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018).
11. Coburn J., Karanja I. Informal settlements and attitudes to healthcare in Nairobi, Kenya: sanitation, gender and dignity. *Health Promotion. Int.* 31, 258–269 (2014).
12. Jiang B., Klaramunt S., 2004. "Topological analysis of urban street networks" *Environment and Planning in: Planning and Design* 31: 151–162.
13. Jiang B., Zhao S., Yin J., 2008. "Self-organizing natural roads for predicting traffic flow: a sensitivity study". *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* July, p. 07008.
14. Kostov S., Tobias R. *The City in Form: Urban Models and Meanings through History* (Little, Brown and Co., 1999).
15. Mani A., Mullainathan S., Shafir E., Zhao J. Poverty hinders cognitive functions. *Science* 341, 976–980 (2013).
16. Mitlin D. C., Satterthwaite D. *Urban Poverty in the Global South: Scale and Nature* (Routledge, 2013).
17. Porta S., Krasiti P., Latora V. Network analysis of city streets: a dual approach. *Physics A* 369, 853–866 (2006).
18. Rees J. A. *How the Other Half Lives* (Seven Treasures Publications, 2009).
19. Schirmer P.M., Axhausen K.V. Multiscale classification of urban morphology. *J. Transp. Land use* 9, 101–130 (2015).
20. Sklar E.D., Garou P., Carolyn G. The problem of slum health and cities of the 21st century. *Lancet* 365, 901–903 (2005).
21. Vera J. Public Federations and Urban Improvement: The work of Pamoja Trust and Muungano in Kenya. *Environment. Urban.* 16, 47–62 (2004).
22. UN-Habitat, *Streets as tools for urban transformation in slums* (UN-Habitat, 2014).
23. United Nations Human Settlements Program, *The Slum Problem: Global Report on Human Settlements, 2003* (Earthscan Publications, 2003).

## REFERENCES

1. Baranov D. N., Romanchenko O. V. Trends in the development of the urbanization process in the world with a forecast up to 2050 (Tendentsii razvitiia protsesa urbanizatsii v mire s prognozom do 2050 goda) // *Innovative development of society: conditions, contradictions, priorities: materials of the X International scientific conference (Innovacionnoe razvitie obshchestva: usloviya, protivorechiya, priority: materialy X Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii)*: in 3 parts. Moscow, March 27, 2014. Part 2. Moscow: Moscow University named after S.Yu. Witte, 2014. Pp. 263–273 [in Russian].
2. Merdassa F. T. Spatial and structural features of informal settlements in cities of developing countries (Prostranstvennye i strukturnye osobennosti neformal'nykh poselenii v gorodakh razvivaiushchikhsia stran) // *Science and Education Today (Nauka i obrazovanie segodnya)*. 2020. No. 12 (59). Pp. 108–111. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennye-i-strukturnye-osobennosti-neformalnyh-poseleniy-v-gorodah-razvivayuschikhsya-stran/viewer> [in Russian].
3. Salmina O. E., Bystrova T. Y. Principles of creating sustainable architecture (Printsipy sozdaniia ustoichivoi arkhitektury) // *Academic Bulletin of URALNIIIPROEKT RAACS (Nauchnyi vestnik RAASN "URALNIIIPROEKT")*. 2015. No. 4. Pp. 36–40. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsipy-sozdaniyaustoychivoy-arhitektury/viewer> [in Russian].
4. Chernyshev S. A. *Socio-psychological deformation of diffuse groups and their rehabilitation in a crisis society (Sotsial'no-psikhologicheskaya deformatsiya diffuznykh grupp i ikh rehabilitatsiya v krizisnom obshchestve)*: dissertation abstract for the degree of Dr. Psychol. Sciences. Yaroslavl, 1999 [in Russian].
5. Abico A., de Azevedo Cardoso L. R., Rinaldelli R., Haha H. K. R. The main costs of slum upgrading in Brazil. *Urban development* (2007).
6. Alexander C. A city is not a tree. *Arch. Forum* 122, 58–62 (1965).
7. Andavarapu D., Edelman D. J. The evolution of slum reconstruction policy. *Carr. City Garden*. 1, 185–192 (2013).
8. Batty M. *The New Science of Cities* (MIT Press, 2013).
9. Brailsford K., Martin T., Hunt J., Bettencourt L. M. A. *On the way to cities without slums: Topology and spatial evolution of neighborhoods*. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018). August 29, 2018 of 8.
10. Brailsford C., Martin T., Hand J., Bettencourt L. M. A. *Toward cities without slums: Topology and the special evolution of neighborhoods*. *Sci. Adv.* 4, eaar4644 (2018).
11. Coburn J., Karanja I. Informal settlements and attitudes to healthcare in Nairobi, Kenya: sanitation, gender and dignity. *Health Promotion. Int.* 31, 258–269 (2014).
12. Jiang B., Klaramunt S., 2004. "Topological analysis of urban street networks" *Environment and Planning in: Planning and Design* 31: 151–162.
13. Jiang B., Zhao S., Yin J., 2008. "Self-organizing natural roads for predicting traffic flow: a sensitivity study". *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. July, p. 07008.
14. Kostov S., Tobias R. *The City in Form: Urban Models and Meanings through History* (Little, Brown and Co., 1999).

15. Mani A., Mullainathan S., Shafir E., Zhao J. Poverty hinders cognitive functions. *Science* 341, 976–980 (2013).
16. Mitlin D. C., Satterthwaite D. *Urban Poverty in the Global South: Scale and Nature* (Routledge, 2013).
17. Porta S., Krasiti P., Latora V. Network analysis of city streets: a dual approach. *Physics A* 369, 853–866 (2006).
18. Rees J. A. *How the Other Half Lives* (Seven Treasures Publications, 2009).
19. Schirmer P. M., Axhausen K. V. Multiscale classification of urban morphology. *J. Transp. Land use* 9, 101–130 (2015).
20. Sklar E. D., Garou P., Karolyn G. The problem of slum health and cities of the 21st century. *Lancet* 365, 901–903 (2005).
21. Vera J. Public Federations and Urban Improvement: The work of Pamoja Trust and Muungano in Kenya. *Environment. Urban.* 16, 47–62 (2004).
22. UN-Habitat, *Streets as tools for urban transformation in slums* (UN-Habitat, 2014).
23. United Nations Human Settlements Program, *The Slum Problem: Global Report on Human Settlements, 2003* (Earthscan Publications, 2003).

#### **Об авторе:**

**Кассаб Омар Ахмад Саид** — магистр архитектуры, аспирант Московского архитектурного института (государственной академии), кафедра ИТАрх («Информационные технологии в архитектуре»). Область научных интересов — решение проблем неформальных построек в городах третьего мира с использованием современных информационных и вычислительных технологий в проектировании на примере городов Сирии, Индии и Латинской Америки.

#### **About the author:**

**Kassab Omar Ahmad Said** — Master of Architecture, postgraduate student of the Moscow Architectural Institute (State Academy), Department of Information Technologies in Architecture. Scientific field — solving the problems of informal buildings in third world cities using modern information and computing technologies in architecture, on the example of cities in Syria, India and Latin America.