

Научная статья

УДК 504.052

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30105>



А.В. Федюхин ✉, Е.Г. Гашо

Национальный исследовательский университет "МЭИ",  
Москва, Россия

✉ [FedyukhinAV@yandex.ru](mailto:FedyukhinAV@yandex.ru)

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕТАБОЛИЗМА ГОРОДОВ

*Аннотация.* Городские энергосистемы подвержены интенсивному и разнонаправленному влиянию множества технических, экологических, экономических, социальных и культурных факторов. Задача эффективного стратегического планирования урбанизированных территорий является одним из важнейших вызовов, с которым сталкивается наша цивилизация в XXI веке. Ключ к решению данной задачи кроется в разработке междисциплинарного и научно обоснованного подхода к анализу городского метаболизма с позиций энергетической эффективности и экологической безопасности. В сфере городского планирования встречается не так много научных работ о городской энергетике. Чаще внимание уделяется социальным, культурным, экономическим, экологическим или транспортным аспектам. В то же время дефицит электрических и тепловых мощностей в ряде городов России, высокий износ коммунальных сетей, проблемы с вывозом и эффективной утилизацией отходов приводит к необходимости применения системного подхода для анализа энергетических потоков города и сопутствующего экологического ущерба. В настоящей статье проанализированы укрупненные энергетические показатели мегаполисов мира с разработкой методического подхода к изучению энергоэкологического метаболизма города.

*Ключевые слова:* метаболизм городов, городское планирование, коммунальная энергетика, энергопотребление, энергосбережение.

*Для цитирования:*

Федюхин А.В., Гашо Е.Г. Методические подходы к анализу энергоэкологического метаболизма городов // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 91–107. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30105>

A.V. Fedyukhin  , E.G. GashoNational Research University "Moscow Power Engineering Institute",  
Moscow, Russia FedyukhinAV@yandex.ru

## METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ANALYSIS OF ENERGY-ECOLOGICAL METABOLISM OF CITIES

*Abstract.* Urban energy systems are subject to the intense and multidirectional influence of a variety of technical, environmental, economic, social and cultural factors. The task of effective strategic planning of urbanized territories is one of the most important challenges facing our civilization in the 21st century. The key to solving this problem lies in the development of an interdisciplinary and scientifically based approach to the analysis of urban metabolism from the standpoint of energy efficiency and environmental safety. There are not many scientific papers on urban energy in the field of urban planning. More often, attention is paid to social, cultural, economic, environmental or transport aspects. At the same time, the shortage of electrical and thermal capacities in a number of Russian cities, high wear of utility networks, problems with the removal and effective disposal of waste leads to the need for a systematic approach to analyze the energy flows of the city and the associated environmental damage. This article analyzes the enlarged energy indicators of megacities of the world with the development of a methodological approach to the study of the energy-ecological metabolism of the city.

*Keywords:* urban metabolism, urban planning, municipal energy system, energy consumption, energy conservation.

*Citation:*

A.V. Fedyukhin, E.G. Gasho, Methodological approaches to the analysis of energy-ecological metabolism of cities, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 91–107, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30105>

**Введение.** Современные подходы по повышению качества жизни в мегаполисах направлены, как правило, на цифровизацию и автоматизацию функционирования систем жизнеобеспечения города. Не принижая значимости концепции Smart City или методики оценки IQ городов Российской Федерации, стоит уделять большее внимание энергетической и технологической эффективности мегаполиса с сохранением требований по экологической безопасности инфраструктуры. Разработка практически обоснованного базиса для анализа энергетических потоков позволит задать вектор городского планирования в контексте увязки схем тепло-, электро- и топливоснабжения (в частности, газоснабжения) для повышения безопасности и автономности функционирования урбанизированных территорий.

Важно отметить, что подходы по оценке метаболизма города с акцентом на экономические факторы, такие как: ВВП на душу населения или ВВП на единицу потребленной энергии несут в себе риски спекулятивного характера. Переход на денежные эквиваленты при анализе проблем системного характера чреват выбором стратегически неверных решений в силу сильной волатильности стоимости широкого спектра товаров и услуг. Тем самым важно оперировать, в первую очередь, физическими величинами на базе материальных и энергетических балансов. В то же время, энергоэкологический метаболизм – это не балансовый метод в чистом виде, а алгоритм поиска направлений стратегического планирования города, опирающийся на топливно-энергетический баланс и иные документы, регламентирующие его энергетическое хозяйство.

### Обзор методических подходов к анализу метаболизма городов

Стратегическое планирование города является многомерной и многоуровневой задачей, охватывающей взаимосвязанные аспекты жизни человека и поэтому по природе своей может быть решена исключительно в разрезе междисциплинарного научного подхода. Как правило, под стратегическим планированием городского развития подразумевается метод обеспечения конкурентоспособности города в условиях глобализации и с акцентом на социально-экономические показатели. В то же время вопросы стратегического планирования энергосистемы города зачастую рассматриваются в отраслевых документах, такие как Схемы тепло-, газо- и электроснабжения, Техническая политика локальных энергокомпаний или Энергетическая стратегия (Генеральная схема энергоснабжения) города.

В сфере городского планирования встречается не так много научных работ о городской энергетике. Чаще внимание уделяется социальным, культурным, экономическим, экологическим или транспортным аспектам [1, 2]. В то же время дефицит электрических и тепловых мощностей в ряде городов России, высокий износ коммунальных сетей, проблемы с вывозом и эффективной утилизацией отходов приводит к необходимости применения системного подхода для анализа энергетических потоков города и сопутствующего экологического ущерба.

Увеличение численности населения городов и тенденция к образованию городских агломераций неизбежно приводят к усложнению транспортной, энергетической и коммунальной инфраструктуры [3]. Что в свою очередь, повышает требования к управлению и упорядочиванию потоков энергоресурсов и отходов, образующихся на урбанизированных территориях [4, 5]. Термин «городской метаболизм» появляется в научно-технической литературе середине 60-х годов. В [6] приводится обзор оригинальных источников, в которых предложены концептуальные основы социально-экологического метаболизма городов. Ермолаева П.О. подчеркивает, что ряд исследований направлено на количественный анализ материальных потоков с построением различных моделей и балансов. В то же время городской метаболизм часто рассматривается в контексте политических, исторических или социальных наук, оставляя вне фокуса внимания энергетические, технологические и экологические аспекты функционирования мегаполиса.

Пилотным исследованием в области городского метаболизма принято считать работу Уолмана [7], который в 1965 году представил структуру города с учетом потоков энергии, отходов и водных ресурсов. С современной точки зрения такой подход может казаться упрощенным на фоне наличия практики составления топливно-энергетических балансов регионов и населенных пунктов, однако, работа Уолмана позволила, в первую очередь, акцентировать внимание на данной проблематике и создать базис для дальнейших исследований. Следующей важной вехой стала разработка специфичных количественных показателей для оценки особенностей функционирования городской инфраструктуры. В представленной в 1983 году работе Одума [8] предложена методика оценки энергетических потоков через эквиваленты солнечной энергии как универсальной метрики. Очередной виток развития исследований в данной области пришелся на 2000-е годы, когда в научно-технической литературе и средствах массовой информации начали широко обсуждаться вопросы возобновляемых источников энергии, способов обращения с отходами и снижения выбросов парниковых газов.

В [9] понятие городской метаболизм трактуется следующим образом: «Городской метаболизм – это системно-ориентированный подход к пониманию взаимосвязи между социально-экономическим положением города и природной средой посредством использования ресурсов». В качестве первого шага специалисты разделили территорию Китая на 5 климатических зон, далее ввели следующие переменные:

- валовый внутренний продукт на душу населения;
- численность населения;
- плотность населения;

- тип климата;
- годовое потребление топливно-энергетических и природных ресурсов, включая электроэнергию, ископаемое топливо, биомассу, воду, минералы, металлы, строительные материалы.

Такой подход позволит получить набор укрупненных удельных энергетических, экономических и экологических показателей для классификации городов Китая с использованием модели классификации и регрессии с построением дерева (CART). Результатом исследования стало выделение 8 метаболических профилей городов: тип I (низкий уровень метаболизма), тип II (уровень метаболизма от низкого до среднего), тип III (биомасса и строительные материалы доминируют в метаболическом профиле), тип IV (электричество и ископаемое топливо доминируют в метаболическом профиле), тип V (электричество и вода доминируют в метаболическом профиле), тип VI (ископаемое топливо доминирует в метаболическом профиле), тип VII (средний и высокий уровень метаболизма) и тип VIII (общее потребление топливно-энергетических доминирует в метаболическом профиле).

Специалисты Лувенского научно-исследовательского института ландшафта, архитектуры и застроенной среды (Бельгия) рассматривают проблематику городского метаболизма через призму экосистемных услуг [10]. При таком подходе основной акцент направлен на анализ эффективности потребления и регенерации городом природных ресурсов: биомасса, ископаемое топливо, минералы и пр. В фокус внимания в качестве выходных потоков попадают выбросы вредных веществ, твердые коммунальные отходы и канализационные стоки. Предложенная авторами модель городского метаболизма позволяет выделить основные угрозы (изменение климата, истощение плодородных земель и пр.), управляющие воздействия (промышленное производство, сельское хозяйство и пр.), а также удельные показатели потребления ресурсов, показав зависимость между ними.

В [11] представлен оригинальный инструмент на основе машинного обучения, способный не только обрабатывать большие массивы статистических данных о текущем состоянии городской среды, но и прогнозировать динамику изменения ключевых показателей метаболизма. В качестве объекта специалисты рассматривают г. Лиссабон, выделяя следующие группы индикаторов: социальные, культурные, технологические, экологические. В качестве результата инструмент предлагает количественную оценку по следующим показателям: финансовый и человеческий капитал, состояние окружающей среды, уровень системы здравоохранения и пр.

Методика, представленная в [12], направлена на исследование материальных потоков города. Причем, специалистов интересует не только конечное потребление энергоресурсов и продуктов внутри населенного пункта, но и так называемый материальный след, который учитывает всю цепочку производства конечного продукта. В методике выделяется два основных показателя: внутреннее потребление материалов (общее количество материалов, непосредственно использованных в экономике города), индикатор материального следа (общее количество материалов, использованных вне экономики города для создания потребляемых материалов и продуктов). Материальные потоки, в свою очередь, подразделяются на четыре основные группы: биомасса, ископаемые, металл, неметалл. Подобная методика позволяет оценить основные цепочки поставок энергоресурсов и иных продуктов, а также систематизировать города по типу промышленных производств.

С учетом мирового тренда на декарбонизацию встречаются методики, рассчитывающие углеродный след в контексте городского метаболизма. В [13] проводится сравнение углеродного следа Пекина, Шанхая, Вены и Мальмё с выделением семнадцати секторов: сельское хозяйство, добыча полезных ископаемых, промышленность, энергетика, водоснабжение, строительство, торговля, транспорт, жилая недвижимость, связь, финансы, коммерческая недвижимость, наука, безопасность, образование, здравоохранение, искусство. Данный подход позволяет не только оценить валовые выбросы при разделении по секторам, но и сравнить удельные показатели на душу населения для разных населенных пунктов.

Схожий подход, однако, в более упрощенной форме наблюдается в работе [14]. Специалисты приводят краткий обзор развития подходов к оценке городского метаболизма и предлагают наряду с традиционными энергетическими и материальными потоками учитывать углеродный след. Важно отметить, что в [24] приводятся данные по валовым и удельным выбросам парниковых газов для десятков городов Европы, Азии и Северной Америки.

Отдельного внимания заслуживают работы, посвященные исследованию метаболизма с акцентом на проблематику рассматриваемого города. К примеру, в [15] объектом внимания является г. Бангалор и его система водоснабжения и водоотведения, являющаяся критически важным инфраструктурным элементом. Специалисты отмечают, что города все больше зависят от крупных источников воды, таких как отдаленные реки, моря и океан, для удовлетворения своих потребностей в воде. Однако, баланс водопотребления крупных городов можно оптимизировать, используя альтернативные местные источники воды, такие как сточные воды, дождевая вода и ливневая канализация. Предложенная модель позволяет рассчитать потенциал в рациональном потреблении водных ресурсов и использовании местных источников воды.

Схожие задачи решаются в [16], однако, для данного объекта исследования (г. Порт-Луи, о. Маврикий) уязвимой точкой является система обращения с отходами. В силу островного расположения города, метаболический подход рассматривается в парадигме потребления первичных энергоресурсов и продуктов с фокусом на объем образующихся отходов и методы их эффективной и экологичной утилизации. Причем спектр отходов не ограничивается только твердыми коммунальными отходами, а включает в себя промышленных отходы, загрязненные сточные воды, выбросы парниковых газов, а также тепловое и шумовое загрязнение города.

В свою очередь, в [17] представлена сравнительно простая, но в то же время всеохватывающая модель оценки энергетического аспекта городского метаболизма с разделением на носителей первичной энергии (природные ресурсы), носителей вторичной энергии (промышленность и энергетика) и конечные потребители энергии (транспорт, здания, системы потребления тепловой и электрической энергии и пр.). Такой подход позволяет проследить всю цепочку преобразования энергии в разрезе городской инфраструктуры.

В [18] предложены механизмы стратегического планирования развития города на основе моделирования и оптимизации топливно-энергетического баланса. Авторами выполнены балансовые расчеты энергетического профиля г. Москвы при внедрении ряда мероприятий: утепление зданий, увеличение доли электромобилей, рост комбинированной выработки тепловой и электрической энергии и др. Одним из преимуществ подхода, предложенного в [18] является визуализация топливно-энергетического баланса города с учетом возможности перераспределения различных энергетических потоков в значимости от внедряемых энергосберегающих мероприятий. В то же время требует дополнительной проработки вопрос ранжирования мероприятий по значимости с учетом фактических проблем в сфере энергетики или экологии отдельно взятого города.

Статистические данные по ежегодному потреблению энергии, воды и объему образовавшихся отходов для 27 крупнейших городов мира представлены в [19]. Авторы анализируют динамику изменения упомянутых показателей в разрезе первого десятилетия XXI века по всем городам с населением свыше 10 млн. человек, включая Москву, и оценивают вклад мегаполисов в мировые показатели. К примеру, общее население мегаполисов составляет 6,7 % от мирового, тогда как ВВП – 14,6 %, потребление электроэнергии – 9,3 %, объем отходов – 12,6%.

В [20] на примере Сан-Паулу предложен оригинальный подход по оценке эффективности потребления энергии городом на основе эксергетического анализа. Специалисты университета Сан-Паулу классифицируют как виды потребителей (промышленность, транспорт, коммерческие здания и др.), так и виды энергоносителей (природный газ, этанол, электроэнергия) с составлением балансов и оценкой эффективности использования энергии. Такой подход позволяет наглядно сравнивать разные виды потребителей с точки зрения их эксергетической

эффективности, однако, не всегда способен определить реалистичные приоритеты развития города в силу технических, экономических или социальных барьеров для перераспределения энергоносителей в пользу более эффективных потребителей.

### Анализ энергетических показателей города

Известен ряд источников, с помощью которых можно анализировать уровень метаболизма городов: топливно-энергетические балансы городов и регионов, данные государственной статистики по выработке и потреблению энергии, научно-технические публикации, независимые базы данных различных экспертных организаций и университетов. Ключевым моментом является достоверность источника данных и корректность приводимой информации. К примеру, ресурс CDP Cities, States and Regions Open Data Portal<sup>1</sup> имеет огромную базу данных по городам мира, включая информацию о видах источниках генерации электрической энергии. При этом, исходя из данных неочевидно, составлен ли баланс, на основании установленной мощности электростанции или их годовой выработки. При сравнении баланса с государственной статистикой, к примеру, для городских агломераций Торонто<sup>2</sup> или Нью-Йорк<sup>3</sup>, можно заключить, что представленные в CDP Cities, States and Regions Open Data Portal соотношения характерны именно для установленной мощности, тогда как КИУМ возобновляемых источников энергии не так высок (обычно 10–20 %), а доля в объеме вырабатываемой энергии существенно уступает доли в установленной мощности (рис. 1 и рис. 2).

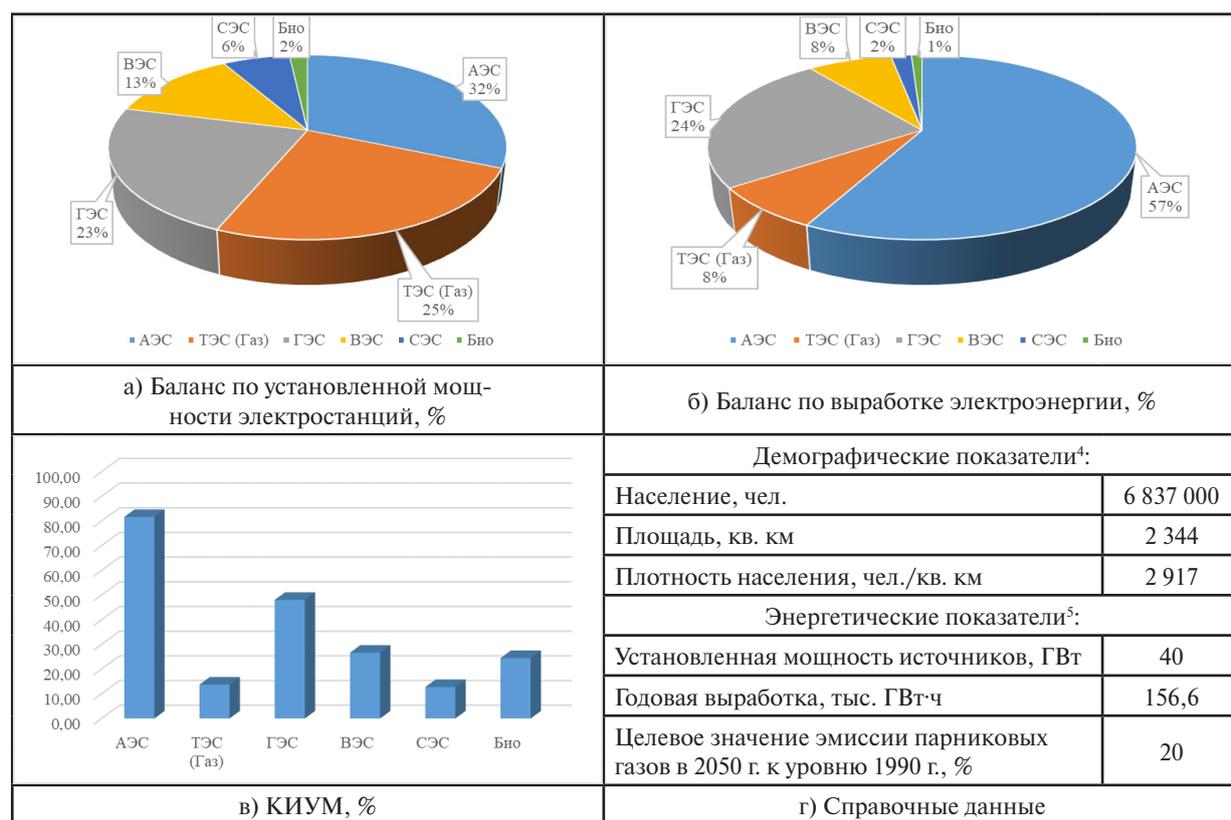


Рис. 1. Энергетический профиль городской агломерации Торонто (Торонто-Гамильтон-Ошава), 2018 г.

Fig. 1. Energy profile of Toronto metropolitan area (Toronto-Hamilton-Oshawa), 2018

<sup>1</sup> CDP Cities, States and Regions Open Data Portal: <https://data.cdp.net/>

<sup>2</sup> Canada Energy Regulator: <https://www.cer-rec.gc.ca>

<sup>3</sup> U.S. Department of Energy: <https://www.energy.gov>

<sup>4</sup> Demographia World Urban Areas. 2023: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf>

<sup>5</sup> Canada Energy Regulator: <https://www.cer-rec.gc.ca>



Рис. 2. Энергетический профиль городской агломерации Нью-Йорк, 2019 г.

Fig. 2. Energy profile of New York City metropolitan area, 2019

Подобные аспекты необходимо учитывать для адекватной оценки реальных перспектив декарбонизации российской энергетической отрасли, потому как города Северной Америки могут рассматриваться в качестве примеров (как удачных, так и неудачных) реализации стратегии углеродной нейтральности с переходом на возобновляемые источники энергии в силу схожих климатических, энергетических и экономических особенностей Российской Федерации, Канады и США.

Электронный ресурс Metabolism of Cities<sup>8</sup> обладает обширной базой статистики потребления топливно-энергетических ресурсов городами за последние 20–25 лет с указанием источника информация (как правило, научные публикации в международных рейтинговых журналах). На рис. 3–6 представлены данные по динамике потребления энергии, воды и объему захоронения отходов крупнейшими городами мира, построенные на основании ресурса Metabolism of Cities. Из российских городов в данной выборке присутствует только г. Москва, как единственный населенный пункт в стране с населением свыше 10 млн. человек. Стоит отметить, что для г. Москвы наблюдается самое значительное снижение потребления воды в период 2001–2011 гг. (–46 %) по сравнению с другими городами, большинство из которых отметились существенным приростом по данному показателю. При этом рост потребления энергии российской столицей за рассматриваемый промежуток времени составил +26 %.

Специалисты Технического университета Онтарио составили схожую базу данных по крупнейшим городам мира<sup>9</sup>. В табл. 1 приведены выборочные демографические, энергетические и

<sup>6</sup> Demographia World Urban Areas. 2023: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf>

<sup>7</sup> U.S. Department of Energy: <https://www.energy.gov>

<sup>8</sup> Metabolism of Cities: <https://metabolismofcities.org/>

<sup>9</sup> Ontario Tech University. Energy and material flows of megacities: <https://ontariotechu.ca/>

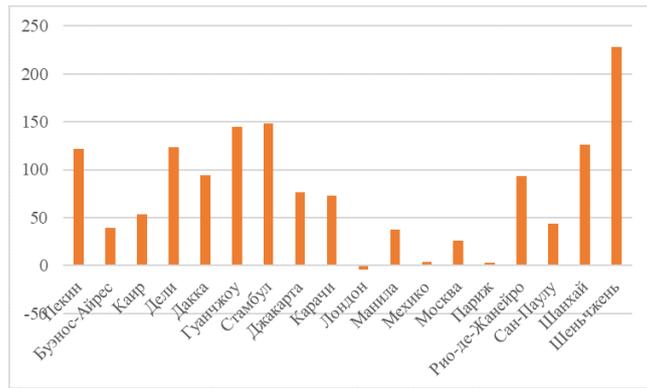


Рис. 3. Динамика потребления энергии стационарными источниками, % 2001–2011 гг.  
 Fig. 3. Dynamics of energy consumption by stationary sources, % 2001–2011

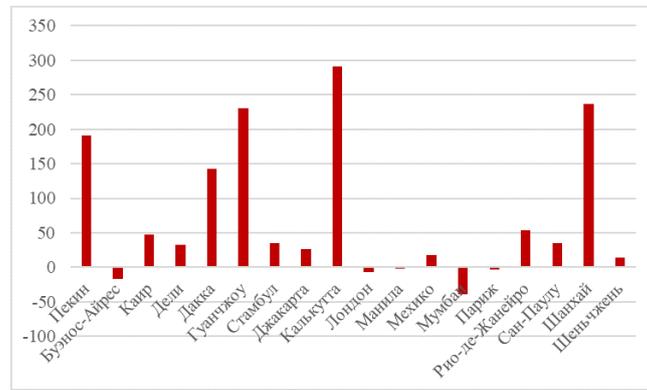


Рис. 4. Динамика потребления энергии транспортом, % 2001–2011 гг.  
 Fig. 4. Dynamics of energy consumption by transport, % 2001–2011

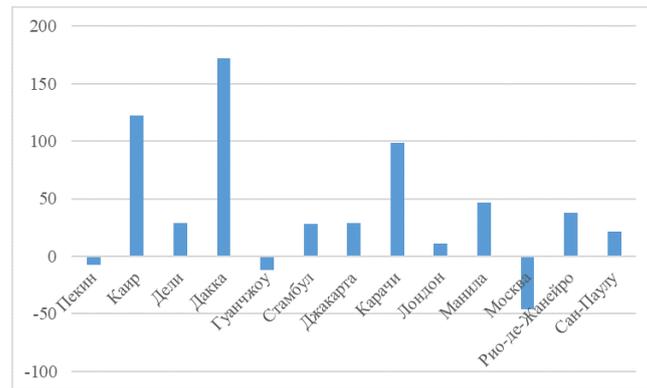


Рис. 5. Динамика потребления воды, % 2001–2011 гг.  
 Fig. 5. Dynamics of water consumption, % 2001–2011

экологические показатели, причем для более корректного сравнения приняты данные за 2011 г., т.к. они имеются для всех городов в вышеназванной базе данных.

Важно внести следующие пояснения касемо данных в табл. 1:

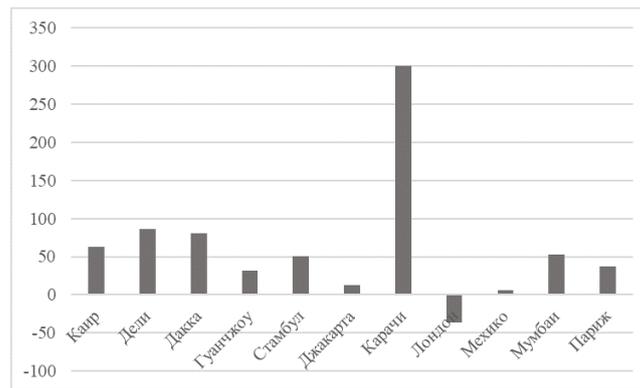


Рис. 6. Динамика захоронения отходов, % 2001–2011 гг.

Fig. 6. Dynamics of waste disposal, % 2001–2011

- графа «Общее потребление энергии» включает как потребление топлива стационарными источниками, так и транспортом;
- графа «Потребление воды» включает суммарное потребление воды городом на все нужды;
- плотность населения рассчитывалась при отнесении на урбанизированную, а не полную площадь города;
- все удельные показатели рассчитывались авторами самостоятельно на основании базы данных.

#### Этапы выработки решений при стратегическом планировании

После рассмотрения данных, представленных в табл. 1, становится очевидным, что напрямую сравнивать показатели городов не совсем корректно в силу разных промышленных, экономических и инфраструктурных особенностей. В частности, углеродный след мегаполисов ядра капиталистической системы (Токио, Париж) может быть выше, чем у городов в странах, которые принято относить к развивающимся (страны БРИКС). Это обусловлено тем, что подушевой углеродный след характеризует не только технологию генерации электрической энергии, но и численность населения с учетом общего уровня развития промышленности рассматриваемого объекта. По этой причине густонаселенные города Юго-Восточной Азии с доминирующей долей угля в энергобалансе могут оказаться «экологичнее» европейских столиц с современной энергосистемой. Поэтому первым этапом при анализе энергоэкологического метаболизма города предлагается ранжирование городов по уровню метаболизма с точки зрения подушевого потребления энергии (табл. 2).

Второй этап – определение текущих ограничений развития и эволюционных ловушек с учетом уровня метаболизма городов. К примеру, Московская область имеет дефицит по располагаемой электрической мощности, а ряд крупных городов Подмосковья – по располагаемой тепловой мощности. Эти аспекты представляют собой текущие ограничения по развитию города с точки зрения повышения уровня его метаболизма. Другим ограничением, отнесенным скорее к будущему, а не к настоящему являются, так называемые, эволюционные ловушки, с которыми неминуемо столкнется город в ближайшей перспективе при сохранении нынешних социокультурных и экономических моделей развития (рис. 7).

Третий этап – анализ климатической уязвимости объектов энергетической инфраструктуры в контексте влияния динамики изменений температуры, влажности и иных погодных условий на режимы работы энергетического оборудования.

Четвертый этап – построение поточных диаграмм и прогнозирование тепло-, электро-, водо- и топливопотребления. Задача представляет собой визуализацию движения энергетических потоков городской среды.

Таблица 1

Основные показатели крупнейших городов мира

Table 1

Main indicators of the largest cities in the world

Город	Население, чел.	Общая площадь, км <sup>2</sup>	Урбаниз. площадь, км <sup>2</sup>	Плотн. населения, чел./км <sup>2</sup>	Удел. площадь строений, м <sup>2</sup> /чел	Потребл. электроэнер., ГВт·ч	Общее потребл. энергии, ГДж	Удел. потребл. электроэнер., кВт·ч/чел	Удел. потребл. энергии, ГДж/чел	Потребл. воды, млн. л.	Удел. потребл. воды, тыс. л./чел
Пекин	20 186 000	16 411	3 377	5 977	40,12	80 686	1 399 001	3 997	69	4 150 800	206
Буэнос-Айрес	12 806 866	3 209	2 477	5 170	—	34 170	688 758	2 668	54	2 186 931	171
Каир	20 495 461	17 393	1 573	13 030	—	30 897	381 568	1 508	19	2 969 258	145
Дели	16 753 235	1 483	1 113	15 052	4,05	21 700	230 222	1 295	14	1 408 500	84
Дакка	15 616 562	1 860	911	17 142	8,09	9 671	396 926	619	25	698 930	45
Гуанчжоу	12 751 400	7 434	—	—	28,99	63 120	1 151 337	4 950	90	7 576 491	594
Стамбул	13 483 052	5 461	5 343	2 523	11,05	38 249	500 195	2 837	37	972 023	72
Джакарта	9 786 372	662	556	17 601	—	35 061	379 645	3 583	39	305 684	31
Карачи	15 500 000	3 527	2 000	7 750	25,89	20 690	317 424	1 335	20	529 900	34
Калькутта	14 112 536	1 887	185	76 284	—	12 383	68 874	877	5	1 382 919	98
Лагос	20 546 999	2 798	1 000	20 547	—	1 600	609 390	78	30	953 924	46
Лондон	8 173 941	1 595	560	14 596	28,39	39 945	713 403	4 887	87	707 266	87
Лос-Анджелес	9 889 000	10 517	—	—	70,00	63 898	1 028 785	6 462	104	3 660 000	370
Манила	11 855 975	636	636	18 641	29,80	49 762	556 932	4 197	47	1 248 090	105
Мехико	8 851 080	1 495	792	11 176	—	13 667	421 394	1 544	48	1 122 400	127
Москва	11 503 501	1 080	737	15 609	—	51 954	1 686 440	4 516	147	1 496 000	130
Мумбаи	12 478 447	603	—	—	—	12 952	107 049	1 038	9	2 070 234	166
Нью-Йорк	22 214 518	—	—	—	—	148 682	2 825 895	6 693	127	10 916 722	491
Осака	17 089 000	—	—	—	55,44	141 335	1 296 336	8 271	76	2 513 774	147
Париж	11 852 851	12 011	2 535	4 676	80,23	68 215	749 196	5 755	63	1 712 297	144
Рио-де-Жанейро	11 909 897	5 328	1 084	10 987	—	33 241	335 322	2 791	28	1 587 242	133
Сан-Паулу	19 822 559	7 947	1 958	10 124	—	53 830	575 582	2 716	29	2 004 998	101
Сеул	10 528 774	606	363	29 005	58,59	46 903	815 311	4 455	77	1 150 338	109
Шанхай	23 474 600	6 340	—	—	41,79	126 913	2 118 862	5 406	90	9 749 000	415
Шэньчжень	10 467 400	2 020	1 992	5 255	—	69 606	357 514	6 650	34	2 005 265	192
Тегеран	12 183 391	18 900	1 390	8 765	—	24 691	1 110 806	2 027	91	1 111 734	91
Токио	35 622 000	—	—	—	48,39	240 783	2 561 871	6 759	72	4 186 440	118



Рис. 7. Типовые ограничения и эволюционные ловушки городов

Fig. 7. Typical constraints and evolutionary traps of cities



Рис. 8. Методический подход к изучению метаболизма города

Fig. 8. Methodological approach to the study of the urban metabolism

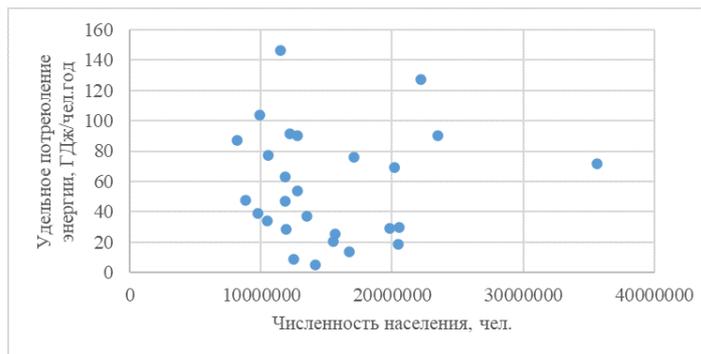


Рис. 9. Зависимость удельного потребления энергии от численности населения (ГДж/чел. от чел.)

Fig. 9. Dependence of specific energy consumption on the population (GJ/person per person)

Таблица 2

**Ранжирование мегаполисов по уровню метаболизма**

Table 2

**Ranking of megacities by metabolic rate**

Уровень метаболизма	Примеры городов	Специфика
Крайне низкий (до 10 ГДж/чел·год)	Калькутта, Мумбаи	Высокая плотность населения при отсутствии крупных промышленных потребителей
Низкий (от 10 до 25 ГДж/чел·год)	Каир, Дакка, Дели, Карачи	Потенциальные точки экономического роста с перспективой повышения уровня метаболизма
Средний (от 25 до 70 ГДж/чел·год)	Пекин, Буэнос-Айрес, Стамбул, Джакарта, Лагос, Манила, Мехико, Париж, Рио-де-Жанейро, Сан-Паулу, Шеньчжень	Города со сложившейся энергетической и промышленной структурой, являющиеся экономическими центрами регионов и стран
Высокий (от 70 до 100 ГДж/чел·год)	Гуанчжоу, Лондон, Осака, Сеул, Шанхай, Тегеран, Токио	Столицы, а также крупные промышленные и экономические центры стран с лидирующим вкладом в мировую экономику
Крайней высокий (свыше 100 ГДж/чел·год)	Лос-Анджелес, Москва, Нью-Йорк	Мировые экономические столицы

Пятый этап – разработка мероприятий стратегического характера и направлений совершенствования энергоэкологического метаболизма города с учетом текущего уровня метаболизма. Заключительный этап методологии базируется на результатах работы по предыдущим четырем этапам и предназначен для разработки документа стратегического планирования энергетической инфраструктуры города (рис. 8).

**Энергетический предел роста городов**

На рис. 9 представлены данные из табл. 1 по удельному потреблению энергии на человека в привязке к численности населения. Стоит отметить, что явной зависимости из множества точек не наблюдается, что обусловлено разными инфраструктурными особенностями городов.

В то же время если придерживаться предложенной классификации уровня метаболизма (табл. 2) и оставить на рисунке только города с высоким и крайне высоким уровне метаболизма: Гуанчжоу, Лондон, Осака, Сеул, Шанхай, Тегеран, Токио, Лос-Анджелес, Москва, Нью-Йорк,



Рис. 10. Зависимость удельного потребления энергии от численности населения (ГДж/чел от чел.) для городов с высоким и крайне высоким уровнем метаболизма

Fig. 10. Dependence of specific energy consumption on the population (GJ/person per person) for cities with high and extremely high metabolic rates

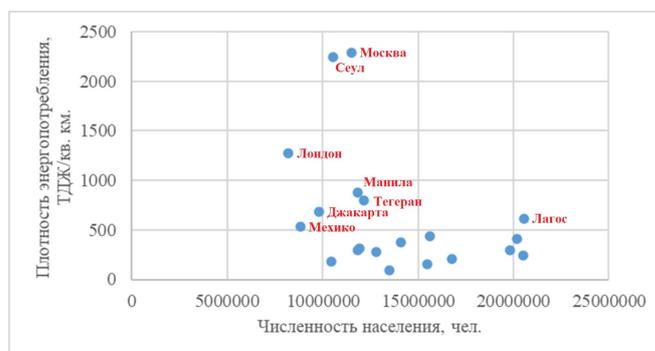


Рис. 11. Зависимость плотности энергопотребления от численности населения (ТДж/км² от чел.)

Fig. 11. Dependence of energy consumption density on the population (TJ/km² per person)

то при достижении численности населения 8–10 млн. человек удельное потребление энергии за редким исключением не растет и составляет около 80 ГДж/чел.·год. Таким образом, дальнейшее разрастание города до 15, 20 или 30 млн. чел. представляет собой повторение существующих практик производства и потребления энергии, что можно классифицировать как энергетический предел роста городов.

Другим показательным критерием является плотность энергопотребления города, величина которого рассчитывается как соотношение общего потребления энергии на урбанизированную площадь. На рис. 11 представлена данная зависимость для городов из табл. 1. Согласно данным на рис. 11, средняя плотность энергопотребления города составляет 500 – 600 ТДж/км², при этом только 3 города: Лондон, Москва и Сеул имеют величину свыше 1000 ТДж/км². При этом явная связь между плотностью энергопотребления, уровнем метаболизма и численностью населения не прослеживается. В группе городов с величиной свыше 500 ТДж/км² присутствуют очень непохожие по энергетической, экономической, климатической и социальной специфике населенные пункты: Москва, Сеул, Лондон, Мехико, Лагос и др.

В свою очередь, наблюдается растущая зависимость плотности энергопотребления от плотности населения (рис. 12). Из тенденций явно выбивается только Калькутта, обладающая крайне высокой плотностью населения (76284 чел./км²) при малом уровне метаболизма (5 ГДж/чел.).

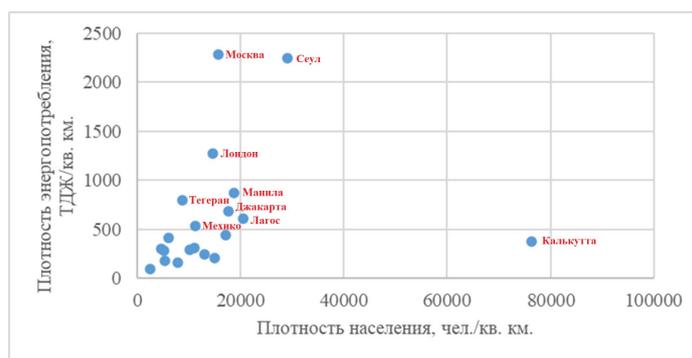


Рис. 12. Зависимость плотности энергопотребления от плотности населения (ТДж/км<sup>2</sup> от чел/км<sup>2</sup>)

Fig. 12. Dependence of energy consumption density on population density (TJ/km<sup>2</sup> from people/km<sup>2</sup>)

### Заклучение

Зачастую под стратегическим планированием городского развития подразумевается метод обеспечения конкурентоспособности города в условиях глобализации и с акцентом на социально-экономические показатели. Однако, с учетом современных климатических и инфраструктурных вызовов стратегическое планирование города является многомерной и многоуровневой задачей, охватывающей взаимосвязанные аспекты жизни человека и поэтому может быть решена исключительно в разрезе междисциплинарного научного подхода.

В качестве перспективных задач с точки зрения исследования энергоэкологического метаболизма городов стоит выделить:

- Расчет топливно-энергетических балансов городов с учетом динамики в разрезе последних 10–25 лет.
- Разработка перечня абсолютных и удельных критериев для типологизации городов.
- Построение моделей прогнозирования уровня метаболизма и перечня мероприятий стратегического характера для групп городов со схожим энергетическим и экологическим профилем.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Xie W., Yang X., Han Z., Sun M., Li Y., Xie H., Yu H., Chen B., Fath B., Wang Y. Urban sector land use metabolism reveals inequalities across cities and inverse virtual land flows. *Resources, Conservation and Recycling* Volume 202, March 2024, 107394. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107394>

[2] Perlaza Rodriguez J.M., Grazia Guida A., Diaz Marquez A.M. Urban metabolism of human settlements in small island-protected environments. *Environmental and Sustainability Indicators* Volume 21, February 2024, 100324. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100324>

[3] Bahers J.-B., Athanassiadis A., Perrotti D., Kampelmann S. The place of space in urban metabolism research: Towards a spatial turn? A review and future agenda. *Landscape and Urban Planning* Volume 221, May 2022, 104376. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104376>

[4] Wang X., Tan X., Gao M., Zhang Y. A review of a series of effective methods in urban metabolism: Material flow, ecological network and factor analysis. *Sustainable Production and Consumption* Volume 39, July 2023, PP. 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.017>

[5] Ning X., Qui Y., Du X., Xing K. Multi-sectoral based innovative approach for evaluating human well-being efficiency of urban metabolism. *Sustainable Cities and Society* Available online 26 January 2024, 105238. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105238>

- [6] **Ермолаева П.О.** Социально-экологический метаболизм городов: концептуализация, научные школы, современные зарубежные исследования // Социологическая наука и социальная практика. – 2015. – № 3 (11). – С. 34–50. – EDN UHWOUB.
- [7] **Wolman A.** The metabolism of cities: Scientific American 213 (3), 179–190, 1965.
- [8] **Odum H.T.** Systems Ecology, an Introduction: Wiley-Interscience, New York, NY, 1983.
- [9] **Xu L., Du H., Zhang X.** A classification approach for urban metabolism using the CART model and its application in China. Ecological Indicators 123 (2021) 107345.
- [10] **Cardenas-Mamani U., Perrotti D.** Understanding the contribution of ecosystem services to urban metabolism assessments: An integrated framework. Ecological Indicators 136 (2022) 108593.
- [11] **Peponi A., Morgado P., Kumble P.** Life cycle thinking and machine learning for urban metabolism assessment and prediction. Sustainable Cities and Society 80 (2022) 103754.
- [12] **Bahers J.-B., Rosado L.** The material footprints of cities and importance of resource use indicators for urban circular economy policies: A comparison of urban metabolisms of Nantes-Saint-Nazaire and Gothenburg. Cleaner Production Letters 4 (2023) 100029.
- [13] **Fath B.D., Strelkovskii N., Wang S., Chen B.** Assessing urban carbon metabolism using network analysis across Chinese and European cities. Cleaner Production Letters 4 (2023) 100042.
- [14] **Kennedy C. Pincetl S., Bunje P.** The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. Environmental Pollution 159 (2011) 1965–1973.
- [15] **Paul R., Kenway S., McIntosh B., Mukheibir P.** Urban Metabolism of Bangalore City: A Water Mass Balance Analysis: Urban Water Metabolism of Bangalore City. Journal of Industrial Ecology. 22. 10.1111/jiec.12705.
- [16] **Zaheer A.** A theoretical application of the Extended Metabolism Model in Port Louis in a bid to promote urban sustainability (2017).
- [17] **Carreon J.R., Worrell E.** Urban energy systems within the transition to sustainable development. A research agenda for urban metabolism. Resources, Conservation & Recycling 132 (2018) 258–266.
- [18] **Яворовский Ю.В., Султангузин И.А., Бартенев А.И., Калякин И.Д., Яшин А.П.** Стратегическое планирование развития города на основе моделирования и оптимизации топливно-энергетического баланса. СОК. № 9. 2022. С. 72–79.
- [19] **Kennedy C.A., Stewart I., Facchini A., Cersosimo I., Mele R., Chen B., Uda M., Kansal A., Chiu A., Kim K.G., Dubeux C., Lebre La Rovere E., Cunha B., Pincetl S., Keirstead J., Barles S., Pusaka S., Gunawan J., Adegbile M., Nazariha M., Hoque S., Marcotullio P.J., González Otharán F., Genena T., Ibrahim N., Farooqui R., Cervantes G., Sahin A.D.** Energy and material flows of megacities. Proc Natl Acad Sci U S A. 2015 May 12; 112 (19): 5985-90. DOI: 10.1073/pnas.1504315112. Epub 2015 Apr 27.
- [20] **Fernandes R., De Oliveira Junior S., Keutenedjan Mady C.E.** Sao Paulo state exergy analysis. Proceedings of ENCIT 2016 16<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. DOI: 10.26678/ABCM.ENCIT2016.CIT2016-0013

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ФЕДЮХИН Александр Валерьевич** – доцент, Национальный исследовательский университет "МЭИ", канд. техн. наук.  
E-mail: FedyukhinAV@yandex.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1819-0450>

**ГАШО Евгений Геннадьевич** – профессор, Национальный исследовательский университет "МЭИ", д-р техн. наук.  
E-mail: 290461@bk.ru

## REFERENCES

- [1] **W. Xie, X. Yang, Z. Han, M. Sun, Y. Li, H. Xie, H. Yu, B. Chen, B. Fath, Y. Wang**, Urban sector land use metabolism reveals inequalities across cities and inverse virtual land flows. *Resources, Conservation and Recycling* Volume 202, March 2024, 107394. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107394>
- [2] **J.M. Perlaza Rodriguez, A. Grazia Guida, A.M. Diaz Marquez**, Urban metabolism of human settlements in small island-protected environments. *Environmental and Sustainability Indicators* Volume 21, February 2024, 100324. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100324>
- [3] **J.-B. Bahers, A. Athanassiadis, D. Perrotti, S. Kampelmann**, The place of space in urban metabolism research: Towards a spatial turn? A review and future agenda. *Landscape and Urban Planning* Volume 221, May 2022, 104376. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104376>
- [4] **X. Wang, X. Tan, M. Gao, Y. Zhang**, A review of a series of effective methods in urban metabolism: Material flow, ecological network and factor analysis. *Sustainable Production and Consumption* Volume 39, July 2023, Pp. 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.017>
- [5] **X. Ning, Y. Qui, X. Du, K. Xing**, Multi-sectoral based innovative approach for evaluating human well-being efficiency of urban metabolism. *Sustainable Cities and Society* Available online 26 January 2024, 105238. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105238>
- [6] **P.O. Yermolayeva**, Sotsialno-ekologicheskii metabolizm gorodov: kontseptualizatsiya, nauchnyye shkoly, sovremennyye zarubezhnyye issledovaniya // Sotsiologicheskaya nauka i sotsialnaya praktika. – 2015. – № 3 (11). – S. 34–50. – EDN UHWOUB.
- [7] **A. Wolman**, The metabolism of cities: *Scientific American* 213 (3), 179–190, 1965.
- [8] **H.T. Odum**, *Systems Ecology, an Introduction*: Wiley-Interscience, New York, NY, 1983.
- [9] **L. Xu, H. Du, X. Zhang**, A classification approach for urban metabolism using the CART model and its application in China. *Ecological Indicators* 123 (2021) 107345.
- [10] **U. Cardenas-Mamani, D. Perrotti**, Understanding the contribution of ecosystem services to urban metabolism assessments: An integrated framework. *Ecological Indicators* 136 (2022) 108593.
- [11] **A. Peponi, P. Morgado, P. Kumble**, Life cycle thinking and machine learning for urban metabolism assessment and prediction. *Sustainable Cities and Society* 80 (2022) 103754.
- [12] **J.-B. Bahers, L. Rosado**, The material footprints of cities and importance of resource use indicators for urban circular economy policies: A comparison of urban metabolisms of Nantes-Saint-Nazaire and Gothenburg. *Cleaner Production Letters* 4 (2023) 100029.
- [13] **B.D. Fath, N. Strelkovskii, S. Wang, B. Chen**, Assessing urban carbon metabolism using network analysis across Chinese and European cities. *Cleaner Production Letters* 4 (2023) 100042.
- [14] **C. Kennedy, S. Pincetl, P. Bunje**, The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution* 159 (2011) 1965–1973.
- [15] **R. Paul, S. Kenway, B. McIntosh, P. Mukheibir**, Urban Metabolism of Bangalore City: A Water Mass Balance Analysis: Urban Water Metabolism of Bangalore City. *Journal of Industrial Ecology*. 22. 10.1111/jiec.12705.
- [16] **A. Zaheer**, A theoretical application of the Extended Metabolism Model in Port Louis in a bid to promote urban sustainability (2017).
- [17] **J.R. Carreon, E. Worrell**, Urban energy systems within the transition to sustainable development. A research agenda for urban metabolism. *Resources, Conservation & Recycling* 132 (2018) 258–266.
- [18] **Yu.V. Yavorovskiy, I.A. Sultanguzin, A.I. Bartenev, I.D. Kalyakin, A.P. Yashin**, Strategicheskoye planirovaniye razvitiya goroda na osnove modelirovaniya i optimizatsii toplivno-energeticheskogo balansa. *SOK*. № 9. 2022. S. 72–79.
- [19] **C.A. Kennedy, I. Stewart, A. Facchini, I. Cersosimo, R. Mele, B. Chen, M. Uda, A. Kansal, A. Chiu, K.G. Kim, C. Dubeux, E. Lebre La Rovere, B. Cunha, S. Pincetl, J. Keirstead, S. Barles, S. Pusaka, J. Gunawan, M. Adegbile, M. Nazariha, S. Hoque, P.J. Marcotullio, F. González Otharán, T. Genena, N. Ibrahim**,

**R. Farooqui, G. Cervantes, A.D. Sahin**, Energy and material flows of megacities. Proc Natl Acad Sci U S A. 2015 May 12; 112 (19): 5985-90. DOI: 10.1073/pnas.1504315112. Epub 2015 Apr 27.

[20] **R. Fernandes, S. De Oliveira Junior, C.E. Keutenedjan Mady**, Sao Paolo state exergy analysis. Proceedings of ENCIT 2016 16<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. DOI: 10.26678/ABCM.ENCIT2016.CIT2016-0013

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Alexander V. FEDYUKHIN** – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute"*.

E-mail: FedyukhinAV@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1819-0450>

**Evgeniy G. GASHO** – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute"*.

E-mail: 290461@bk.ru

Поступила: 28.01.2024; Одобрена: 05.02.2024; Принята: 07.02.2024.

Submitted: 28.01.2024; Approved: 05.02.2024; Accepted: 07.02.2024.