ISSN: 1563-2415 (Print), ISSN: 2959-0469 (Online)

Статистика, учет и аудит, 4(103)2026. стр. 35-49
DOI: https://www.doi.org/10.51579/1563-2415.2026.-4.03

Междисциплинарные исследования в экономике
УДК 332.1
МРНТИ 06.61.53

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПРОЦЕССОВ ГОРОДСКОГО МЕТАБОЛИЗМА

А.Ж. Панзабекова, А.Б. Жанбозова*

Институт экономики Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

**Corresponding author e-mail: aksaulew@mail.ru*

Аннотация. *В статье рассматриваются методические вопросы оценки городского метаболизма применительно к индустриальным городам Казахстана. Цель исследования состоит в разработке подхода к систематизации материальных и энергетических потоков городской системы и определению методов их количественной оценки. На основе анализа существующих подходов предложена многоуровневая классификация потоков по виду ресурса, сфере использования и стадии его движения в пределах города. Рассмотрено назначение анализа материальных потоков, анализа «затраты-выпуск», оценки жизненного цикла и углеродного следа, определены области их применения при исследовании городских ресурсных процессов. В составе городского метаболизма предлагается разграничивать поступающие ресурсы, внутренние преобразования и исходящие потоки, а также учитывать различия в их значении для функционирования городской системы. Применимость предложенного подхода рассмотрена на материалах Актау с использованием официальных данных о выбросах загрязняющих веществ за 2020-2024 гг. и показателей водоснабжения за 2024 г. Установлено, что рост выбросов от стационарных источников не сопровождался соответствующим изменением индекса загрязнения атмосферы, что указывает на необходимость различать физические потоки и показатели состояния окружающей среды. Результаты исследования показывают, что при ограниченности городской статистики оценку метаболических процессов следует проводить последовательно, начиная с тех потоков, по которым имеются территориально сопоставимые и достоверные данные.*

Ключевые слова: *городской метаболизм, материальные потоки, энергетические потоки, индустриальные города, ресурсоэффективность, экологическая нагрузка, Актау.*

Основные положения. В исследовании предложен методический подход к оценке городского метаболизма индустриальных городов, основанный на разграничении поступающих ресурсов, внутренних преобразований и исходящих потоков. Для индустриальных городов Казахстана предложена поэтапная оценка, на первом этапе которой используются доступные городские статистические данные. Апробация подхода на данных по Актау показала, что поэтапная оценка городского метаболизма возможна даже при ограниченной статистике, если данные имеют единый территориальный охват, а физические потоки и показатели состояния окружающей среды анализируются раздельно.

Cite this article as: Panzabekova A.Zh., Zhanbozova A.B. Methodological approaches to assessing urban metabolism processes. *Statistics, accounting and audit*. 2026, *4*(103), 35-49. DOI: https://www.doi.org/10.51579/1563-2415.2026.-4.03

Введение. Рост городов и концентрация промышленного производства усиливают нагрузку на энергетическую, коммунальную и экологическую инфраструктуру, повышая значение эффективного использования материальных и энергетических ресурсов. Для индустриальных городов эта проблема особенно актуальна вследствие интенсивного потребления воды, топлива и сырья, сопровождающегося образованием отходов, сточных вод и выбросов. Повышение ресурсоэффективности и снижение экологического воздействия городов предусмотрены Повесткой дня ООН в области устойчивого развития на период до 2030 года [1].

В Казахстане актуальность рассматриваемой проблематики определяется реализацией Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года, предусматривающей повышение эффективности использования ресурсов и технологическую модернизацию экономики [2]. Достижение этих ориентиров требует системного анализа поступления, преобразования, накопления и выведения ресурсов за пределы городской территории, а не только оценки отдельных показателей потребления и загрязнения окружающей среды.

Концепция городского метаболизма позволяет рассматривать материальные и энергетические потоки во взаимосвязи с функционированием производственной и коммунальной инфраструктуры. Однако её практическое применение осложняется различиями в определении системных границ, методах оценки и требованиях к исходным данным, а также фрагментарностью городской статистики, формируемой различными ведомствами и операторами. В связи с этим цель исследования состоит в разработке методического подхода к оценке городского метаболизма индустриальных городов Казахстана на основе систематизации материальных и энергетических потоков, определения возможностей применения аналитических методов и апробации предложенного подхода на материалах города Актау.

Литературный обзор. Исследования городского метаболизма развиваются на пересечении общественных и естественных наук, что обусловливает разнообразие его теоретических трактовок и аналитических методов. В социально-философской традиции концептуальной основой выступает представление об обмене веществ между обществом и природой, восходящее к работам К. Маркса [3]. В городской политической экологии движение ресурсов рассматривается с учётом институциональных и социально-экономических условий [4], тогда как исторические исследования, в частности работа Дж. Тарра на примере Питтсбурга, раскрывают изменения ресурсного обмена под влиянием индустриализации и развития городской инфраструктуры [5]. Указанные подходы позволяют выявить факторы трансформации городских систем, однако в меньшей степени ориентированы на количественное измерение потоков.

В естественно-научных исследованиях сформировались экологическое и инженерное направления. Экологическая трактовка рассматривает город как открытую систему, функционирование которой обеспечивается постоянным обменом веществом и энергией [6]. В рамках этого направления для оценки ресурсных затрат и взаимосвязей между элементами городской системы применяются энергетический, эмерджи-анализ и экологический сетевой анализ [7, 8]. Вместе с тем значительная потребность в исходных данных и расчётных коэффициентах осложняет их применение при неполной городской статистике.

Инженерное направление связано с количественным учётом материальных и энергетических потоков. А. Волман предложил анализировать функционирование города через поступление необходимых ресурсов и образование отходов [9]. В последующих

исследованиях данный подход был расширен за счёт рассмотрения энергопотребления, накопления материалов в городской инфраструктуре и экологических последствий хозяйственной деятельности [10, 11]. П. Бруннер подчёркивал значение физического учёта для перехода от линейного ресурсопотребления к более рациональной организации материального обмена [12].

Основным инструментом количественной оценки стал анализ материальных потоков, основанный на принципе сохранения массы, и позволяющий сопоставлять поступление ресурсов, их выход из системы и изменение запасов. Применение данного метода на городском уровне осложняется несовпадением административных и фактических границ ресурсоснабжения, а также недостаточной сопоставимостью ведомственных данных. Как показано в исследовании Ван и соавторов, достоверность результатов во многом определяется корректностью установленных системных границ и качеством исходной информации [13].

Для исследования косвенного потребления ресурсов, экологического воздействия отдельных технологий и климатических последствий хозяйственной деятельности применяются анализ «затраты-выпуск», оценка жизненного цикла и методы расчёта углеродного следа. Интеграция аналитических инструментов расширяет возможности исследования, однако требует согласования границ учёта, состава показателей и используемых данных [14]. В современных работах рассматриваются также перспективы разработки цифровых моделей городского метаболизма, для которых особую значимость приобретает методологическая сопоставимость информации [15].

В Казахстане исследования городского метаболизма пока немногочисленны. А.Т. Тлеубердинова и соавторы рассмотрели взаимосвязи между урбанизацией, энергопотреблением, экологической нагрузкой и развитием городской инфраструктуры, подтвердив применимость рассматриваемой концепции к анализу казахстанских городов [16]. Вместе с тем вопросы систематизации материальных и энергетических потоков и выбора методов их оценки применительно к индустриальным городам в условиях ограниченности городской статистики остаются недостаточно разработанными.

Таким образом, несмотря на развитие аналитического инструментария, сохраняется необходимость определения последовательности оценки разнородных ресурсных потоков на уровне конкретного города. Для индустриальных городов Казахстана требуется методический подход, предусматривающий разграничение стадий движения ресурсов, согласование территориальных границ и поэтапное расширение системы показателей по мере повышения доступности статистических данных.

Материалы и методы. Исследование основано на анализе и сравнении научных подходов к оценке городского метаболизма. Рассмотрены возможности анализа материальных потоков, анализа «затраты-выпуск», оценки жизненного цикла и углеродного следа с точки зрения объекта исследования, границ учёта, требований к исходным данным и характера получаемых результатов. На этой основе проведена классификация материальных и энергетических потоков по их виду, сфере использования и стадии движения в городской системе, а также определена последовательность применения отдельных методов оценки. Для проверки предложенного подхода использованы официальные данные по городу Актау: сведения Бюро национальной статистики Республики Казахстан о выбросах загрязняющих веществ от стационарных источников и индексе загрязнения атмосферы за 2020-2024 гг., а также данные акимата города Актау и акимата Мангистауской области о производстве и потребности в питьевой воде в 2024 г. [17-19]. Расчёты выполнены по опубликованным

абсолютным значениям. При отсутствии городских данных показатели областного уровня не использовались, поскольку такое замещение нарушало бы сопоставимость территориальных границ исследования.

Результаты и обсуждение. Оценка городского метаболизма предполагает разграничение поступающих ресурсов, внутренних процессов их преобразования и использования, а также потоков, покидающих городскую систему. К поступающим ресурсам относятся вода, топливо, электрическая и тепловая энергия, продовольствие, сырьё, строительные материалы и готовая продукция. В пределах города они используются населением, промышленностью, транспортом и коммунальным хозяйством, преобразуются, частично накапливаются в основных фондах либо выводятся за пределы системы в виде продукции, отходов, сточных вод и выбросов. Часть ресурсов повторно вовлекается в хозяйственный оборот. Углеродный след при этом рассматривается как расчётный показатель климатического воздействия, связанного с энергопотреблением, использованием материалов и другими видами деятельности.

Для систематизации потоков в исследовании использованы три признака. Первый характеризует вид ресурса и предусматривает выделение материальных и энергетических потоков. Второй отражает сферу использования: жилищный сектор, промышленность, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство и, применительно к агломерациям, сельское хозяйство. Третий признак характеризует стадию движения ресурса: поступление, преобразование и распределение, потребление, накопление, потери, повторное использование, переработку и окончательный выход из городской системы. Соотношение указанных признаков представлено на рисунке 1.

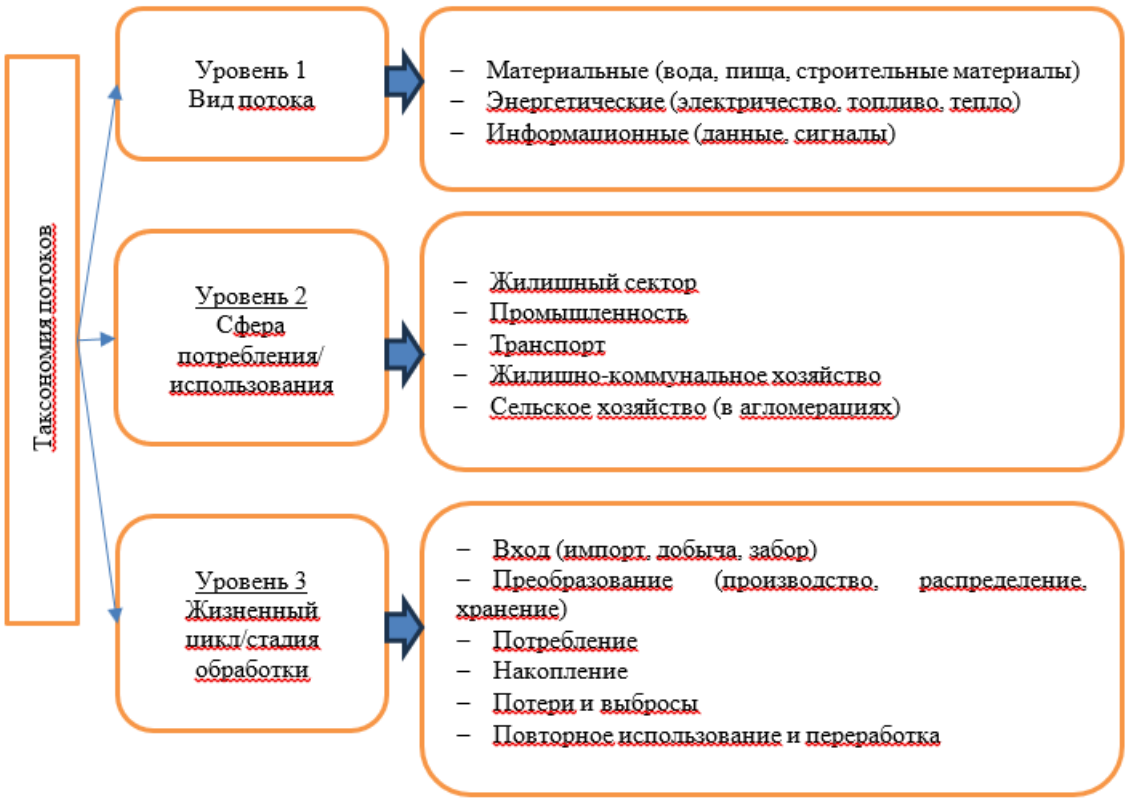


Рисунок 1 – Таксономия потоков городского метаболизма

Предлагаемая классификация обеспечивает систематизацию показателей, различающихся по единицам измерения, периодичности и территориальному охвату. В системе учёта разграничиваются входящие ресурсы, внутренние процессы их преобразования и использования, а также потоки, покидающие городскую систему. Для исключения повторного учёта каждый поступающий материальный ресурс относится только к одной группе с учётом его происхождения и формы на момент пересечения системной границы: сырьё и материалы подразделяются на абиотические и биотические, а готовые изделия, оборудование и комплектующие включаются в группу товаров и полуфабрикатов. Сфера использования и стадия движения рассматриваются как самостоятельные классификационные признаки без повторного суммирования соответствующих величин. Состав основных потоков представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Классификация основных потоков городского метаболизма

№	Основные потоки	Составляющие		Показатели
1	Входящие (Into the city)	Энергия	Электроэнергия, поступающая из внешней сети; природный газ; уголь и мазут; моторное топливо; тепловая энергия при наличии межсистемных поставок	МВт·ч, ГДж; структура, %; удельное потребление
		Вода	Забор воды из поверхностных и подземных источников; поступление от внешнего поставщика; питьевая и техническая вода	м³/год; удельное водопотребление; уровень потерь, %
		Абиотические материалы	Минеральное сырьё, строительные материалы, металлы, стекло, химическое сырьё, полимерные материалы и другие материальные ресурсы небиологического происхождения, за исключением готовых изделий и оборудования.	т/год; удельное потребление
		Биотические материалы и продовольствие	Зерно и мука, мясо и молочная продукция, овощи и фрукты, древесина, бумага, биомасса	т/год; потребление на одного жителя
		Товары и полуфабрикаты	Машины и оборудование, электроника, одежда, лекарственные средства, комплектующие, узлы и полуфабрикаты промышленного производства, поступающие в город в качестве самостоятельных изделий.	т/год; структура, %
2	Внутренние преобразования (Within)	Преобразование энергии	Производство электрической и тепловой энергии на теплоэлектроцентралях и в котельных; использование возобновляемых источников; получение энергии из отходов и биогаза	МВт·ч, ГДж; КПД, %; потери
		Производственные и городские процессы	Промышленное производство, строительство, эксплуатация зданий и сооружений, транспортные процессы	т/год, МВт·ч, ГДж; удельный расход
		Водоснабжение и водоотведение	Распределение и потребление воды; потери в сетях; очистка сточных вод; повторное использование очищенной воды	м³/год; потери, %; доли очистки и повторного использования, %
		Использование материалов	Потребление материалов; образование и сортировка отходов; переработка и повторное использование материалов в пределах городской системы.	Потребление, образование отходов, переработка и повторное использование, т/год

продолжение таблицы 1

3	Исходящие (Out of the city)	Продукция	Промышленная и иная продукция, произведённая в городе и направляемая за его пределы	т/год
		Отходы и вторичные ресурсы	Твёрдые коммунальные, строительные и опасные отходы; осадки сточных вод; металлолом, макулатура, пластмассы и другие виды вторичного сырья	т/год; доли переработки, повторного использования и захоронения, %
		Сточные воды	Очищенные и неочищенные сточные воды, отводимые за пределы рассматриваемой системы; очищенная вода, передаваемая внешним потребителям для повторного использования.	м³/год; степень очистки, %; внешнее повторное использование, м³/год
		Атмосферные выбросы	Парниковые газы и загрязняющие вещества, образующиеся в результате промышленной, энергетической, транспортной и коммунальной деятельности	т/год; т CO_2-экв./год
		Энергия, передаваемая за пределы города	Электрическая и тепловая энергия, передаваемая во внешние сети при наличии межсистемных связей	МВт·ч, ГДж
Примечание: составлена авторами				

Повторное использование очищенной воды в пределах городской системы относится к внутренним процессам, тогда как в составе исходящих потоков учитываются только объёмы воды, пересекающие её территориальные границы, включая сточные воды и очищенную воду, передаваемую внешним потребителям. При этом каждый объём учитывается однократно.

Значимость отдельных потоков определяется ресурсной обеспеченностью города, промышленной специализацией, состоянием инфраструктуры, масштабами потребления и возможностями замещения ресурсов. Для вододефицитных городов приоритетным является водоснабжение, для промышленных центров - энергоснабжение, обеспечение сырьём и обращение с отходами. По степени значимости выделяются критические потоки, обеспечивающие функционирование основных городских систем; значимые, характеризующиеся существенными потерями, инфраструктурной нагрузкой или потенциалом повторного использования; второстепенные, влияние которых в рассматриваемый период относительно невелико. Приоритизация проводится с учётом объёмов потребления, уровня потерь, состояния инфраструктуры и последствий перебоев в ресурсоснабжении, позволяя определить последовательность дальнейшего анализа (рисунок 2).

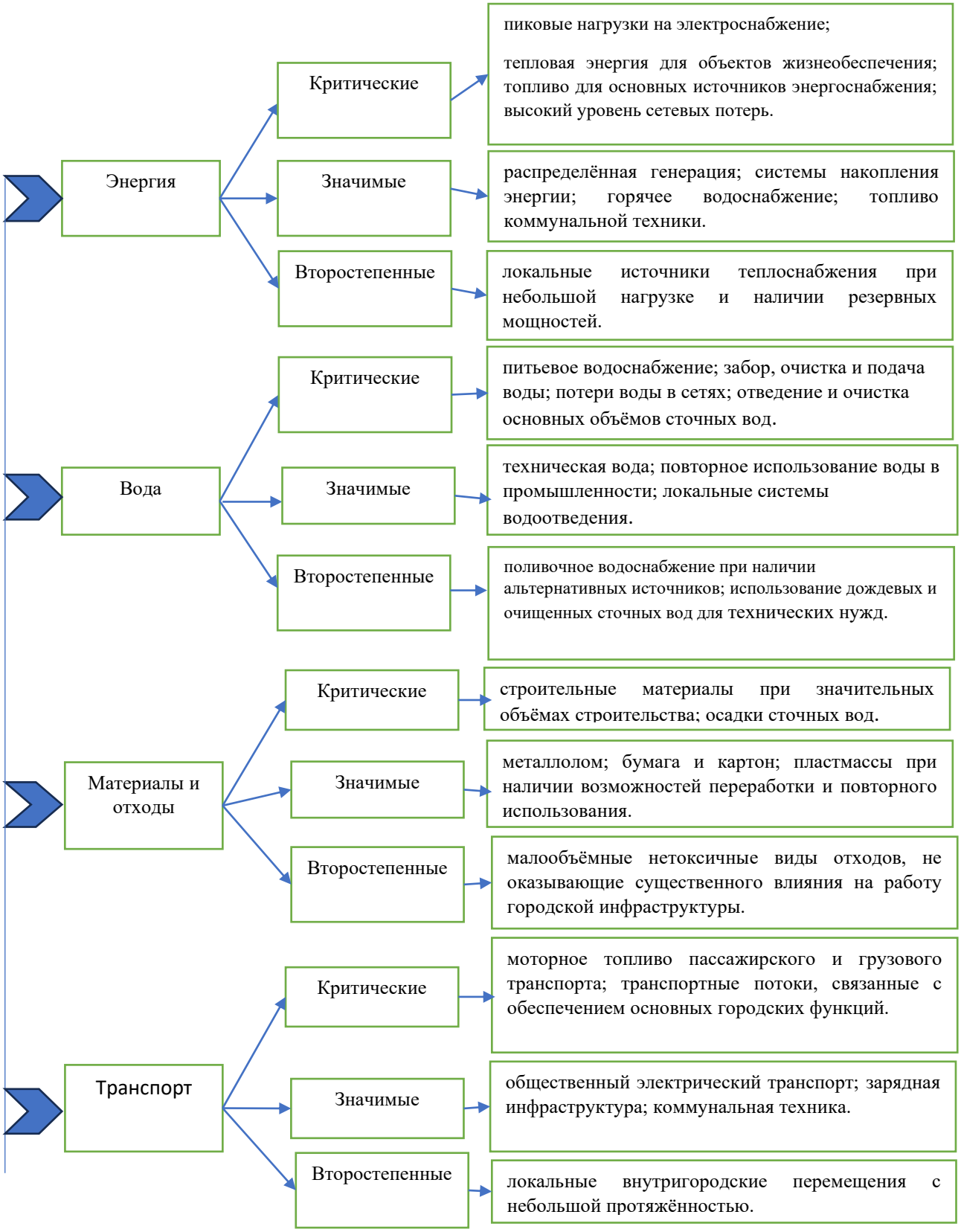


Рисунок 2 - Приоритизация потоков по подсистемам городского метаболизма
Примечание: составлен авторами

Такое ранжирование необходимо прежде всего для определения очередности дальнейшего анализа. При ограниченном объёме исходных сведений целесообразно начинать не со всех возможных показателей одновременно, а с тех ресурсов и воздействий, которые имеют наибольшее значение для функционирования города и обеспечены достоверными данными.

Вопрос о выборе метода возникает уже после определения состава потоков и границ их учёта. Рассмотренные в литературе способы оценки имеют различное назначение и поэтому не могут заменять друг друга. Исследования А. Волмана, К. Кеннеди, С. Пинцетл и других авторов показали значение физического учёта вещества и энергии для анализа городских систем [9-11]. В более поздних работах этот подход был дополнен методами, позволяющими учитывать косвенные затраты ресурсов, воздействие отдельных технологий на протяжении жизненного цикла и выбросы парниковых газов [13-15]. Основные особенности рассматриваемых методов обобщены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика основных методов оценки городского метаболизма

№	Метод	Назначение	Границы и исходные данные	Результаты и ограничения
1	Material Flow Analysis (MFA) – анализ материальных потоков	Количественная оценка поступления, выхода и накопления материальных ресурсов в пределах установленной территории	Территориальные границы города; данные о воде, материалах, продукции, отходах и изменении запасов в физических единицах	Позволяет составлять материальные балансы и определять объёмы поступающих и исходящих потоков и изменение запасов. Применение зависит от полноты и территориальной сопоставимости исходных данных
2	Input-Output Analysis (IOA) – анализ «затраты-выпуск»	Оценка прямых и косвенных затрат ресурсов и экологических воздействий, связанных с производством товаров и услуг	Национальные и региональные таблицы «затраты-выпуск», данные о конечном спросе, ресурсные и эмиссионные коэффициенты	Позволяет учитывать косвенное потребление ресурсов и воздействия, возникающие за пределами города. Использование на городском уровне требует дополнительных расчётов и предположений
3	Life Cycle Assessment (LCA) – оценка жизненного цикла	Оценка воздействия продукции, технологии или объекта инфраструктуры на различных стадиях жизненного цикла	Данные о производстве материалов, строительстве, эксплуатации, ремонте и утилизации; сведения о потреблении ресурсов и выбросах	Применяется при сопоставлении технологических и инфраструктурных решений. Результаты зависят от установленных границ исследования и полноты исходных данных
4	Urban Carbon Footprint (UCF) – углеродный след города	Оценка выбросов парниковых газов, связанных с функционированием городской системы	Данные о потреблении топлива и энергии, транспорте, промышленности, обращении с отходами и соответствующие коэффициенты выбросов	Позволяет оценить климатическое воздействие отдельных видов деятельности и их вклад в совокупные выбросы города. Используется как дополнение к физическому учёту материальных и энергетических потоков
Примечание: составлена авторами на основе [9-15]				

Для первоначальной оценки материальных потоков наиболее обоснованным представляется балансовый метод, основанный на законе сохранения массы. Он позволяет сопоставить количество вещества, поступившего на рассматриваемую территорию, количество вещества, вышедшего за её пределы, и изменение запасов внутри города. В общем виде материальный баланс может быть выражен следующим образом:

$$M_{in} = M_{out} + \Delta S \quad (1)$$

где M_{in}– совокупный материальный вход в систему;

M_{out} – совокупный объем потоков, покидающих установленную системную границу;

ΔS – изменение материальных запасов внутри городской системы.

Производство, распределение и потребление ресурсов внутри городской территории не включаются в правую часть данного равенства как самостоятельные конечные потоки. Они характеризуют промежуточные стадии движения вещества. Однако их изучение необходимо, поскольку именно на этих стадиях возникают технологические потери, формируются запасы и создаются возможности повторного использования материалов. Материальный баланс обеспечивает количественный учёт потоков в физических единицах измерения и позволяет использовать сведения предприятий коммунального хозяйства и официальной статистики. На практике применение метода ограничивается прежде всего отсутствием части необходимых показателей на уровне отдельного города, что отмечается и в современных исследованиях материальных потоков [13].

Иное назначение имеет анализ «затраты-выпуск». С его помощью учитываются ресурсы и экологические последствия, связанные с производством товаров и услуг, которые потребляются в городе, но произведены за его пределами. В общем виде расчёт совокупного воздействия может быть представлен выражением:

$$E = F(I - A)^{-1}y \quad (2)$$

где E – вектор совокупных воздействий;

F – матрица ресурсных или эмиссионных коэффициентов;

A – матрица прямых межотраслевых затрат;

$(I - A)^{-1}$ – матрица полных затрат;

y – вектор конечного спроса.

Таблицы «затраты–выпуск» обычно составляются для страны или крупного региона, а их использование применительно к городу требует дополнительных расчётов и предположений. Поэтому этот метод целесообразно применять после физического учёта ресурсов и лишь в тех случаях, когда необходимо определить косвенное потребление или воздействие, возникающее за пределами городской территории.

Оценка жизненного цикла решает более узкую задачу и наиболее полезна при сопоставлении конкретных технологий, видов продукции и объектов инфраструктуры. Она позволяет учитывать воздействие на стадиях производства материалов, строительства, эксплуатации, ремонта и последующей утилизации. В городском

хозяйстве такой метод может применяться при выборе технологий водоочистки, теплоснабжения, переработки отходов, строительства и транспорта. Его распространение на весь город требует значительного объёма исходной информации и большого числа расчётных предположений, поэтому область применения должна определяться конкретной исследовательской задачей.

Расчёт углеродного следа позволяет привести выбросы различных парниковых газов к единому измерителю и определить вклад энергетики, транспорта, промышленности и обращения с отходами в общую величину выбросов. Однако этот показатель не отражает движение материальных ресурсов, изменение запасов и величину потерь. Следовательно, углеродный след дополняет физический учёт, но не может его заменить.

Сопоставление методов подтверждает, что каждый из них имеет собственную область применения. Объединение различных способов расчёта [14, 15] не может гарантировать повышения точности результатов. В условиях ограниченности городской статистики усложнение расчётных процедур может сопровождаться увеличением числа допущений и затруднять интерпретацию полученных результатов.

Для индустриальных городов Казахстана более оправдан последовательный порядок работы. Сначала необходимо установить территориальные границы исследования и определить основные входящие и исходящие потоки. Затем по имеющимся достоверным сведениям могут быть составлены физические балансы отдельных ресурсов. После этого устанавливаются наиболее существенные потери и виды воздействия, а дополнительные методы применяются только там, где качество данных позволяет получить обоснованный результат.

Апробация предложенного подхода проведена на данных по городу Актау. Выбор города связан с его промышленной специализацией и особенностями водоснабжения. Значительная часть питьевой воды производится путём опреснения морской воды, вследствие чего обеспечение населения и предприятий зависит от производительности соответствующих установок. Одновременно в городе действуют стационарные источники загрязнения атмосферы. Эти обстоятельства позволяют рассмотреть показатели, относящиеся к разным сторонам городского хозяйства: поступлению необходимого ресурса и воздействию производственной деятельности на окружающую среду. Пятилетний ряд по выбросам загрязняющих веществ и индексу загрязнения атмосферы приведён в таблице 3.

Таблица 3 – Динамика выбросов загрязняющих веществ и индекса загрязнения атмосферы в г. Актау за 2020-2024 гг.

Показатели	2020	2021	2022	2023	2024	Изменение в 2024 г. к 2020 г., %
Выбросы от стационарных источников, тыс. т	2,5	2,6	3,0	3,9	4,0	+60,0
Индекс загрязнения атмосферы (ИЗА)	4,0	6,0	9,0	5,0	4,0	0,0
Примечание: составлена авторами по данным Бюро национальной статистики Республики Казахстан [17]						

По данным Бюро национальной статистики Республики Казахстан, объём выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников увеличился с 2,5 тыс. т в 2020 г. до 4,0 тыс. т в 2024 г., то есть на 60 % [17]. Индекс загрязнения атмосферы за тот же период изменялся иначе: с 4,0 в 2020 г. он повысился до 6,0 в 2021 г. и 9,0 в 2022 г.,

после чего снизился до 5,0 в 2023 г. и 4,0 в 2024 г. Наибольший объём выбросов пришёлся на 2024 г., а наиболее высокое значение индекса загрязнения атмосферы было отмечено двумя годами ранее. Это объясняется тем, что показатели имеют разное содержание. Объём выбросов отражает количество загрязняющих веществ, поступивших в атмосферу от учтённых стационарных источников, тогда как индекс загрязнения характеризует состояние атмосферного воздуха и зависит от состава загрязняющих веществ, их концентрации, условий рассеивания и организации наблюдений. По этой причине прямое отождествление этих показателей было бы неверным.

Сведения о водоснабжении Актау характеризуют ресурсную сторону городского метаболизма. По официальным данным за 2024 г., производственная мощность ТОО «МАЭК» составляла 52 тыс. м³ питьевой воды в сутки, тогда как в период высоких летних температур фактическая выработка снижалась примерно до 46 тыс. м³ в сутки. Дополнительная потребность города оценивалась в 20-25 тыс. м³ в сутки [18, 19]. Эти данные показывают соотношение между имеющимися производственными возможностями и фактической потребностью города в одном из основных ресурсов жизнеобеспечения.

Анализ материалов по Актау показал ограничения городской статистики. Поэтому на данном этапе оценку следует основывать на тех потоках, по которым имеются достоверные сведения именно по городу. По мере расширения статистического учёта состав показателей может быть дополнен данными об энергетических ресурсах, сточных водах, отходах и вторичном сырье, что позволит в дальнейшем формировать более полные материальные и энергетические балансы индустриальных городов Казахстана.

Заключение. В результате исследования был разработан методический подход к оценке городского метаболизма индустриальных городов Казахстана, основанный на разграничении входящих материальных и энергетических потоков, внутренних преобразований и исходящих потоков. Предложенная классификация по виду ресурса, сфере использования и стадии движения в сочетании с правилом однократного отнесения поступающих ресурсов к соответствующим группам позволяет систематизировать показатели и снизить риск повторного учёта.

Апробация подхода на материалах Актау подтвердила возможность поэтапной оценки городского метаболизма в условиях ограниченной статистической информации. Анализ данных за 2020–2024 гг. выявил увеличение выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников при иной динамике индекса загрязнения атмосферы, что подтверждает необходимость разграничения физических потоков и показателей состояния окружающей среды.

Основным ограничением комплексной оценки остаётся недостаток сопоставимых городских данных об энергопотреблении, водоотведении, обращении с отходами и материальных запасах. Дальнейшее развитие методического подхода связано с совершенствованием статистического учёта и согласованием территориальных и временных границ показателей, что создаст предпосылки для формирования полных материальных и энергетических балансов, межгородских сопоставлений и обоснования решений в сфере ресурсного обеспечения индустриальных городов Казахстана.

Информация о финансировании. Исследование выполнено в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту AP26101517 «Устойчивое развитие и проблемы метаболизма в индустриальных городах Казахстана: оценка и сценарии» (2025-2027 гг.).

Список литературы

1. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года: Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН от 25 сентября 2015 года A/RES/70/1 [Электронный ресурс]. – URL: https://sdgs.un.org/2030agenda (дата обращения: 09.10.2026).
2. Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года: Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121 // Информационно-правовая система «Әділет». – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121 (дата обращения: 09.10.2026).
3. Маркс К. Капитал. Критика политической экономии. Т. 1, кн. 1: Процесс производства капитала. – М. : Политиздат, 1978. – 907 с.
4. Wachsmuth D. Three Ecologies: Urban Metabolism and the Society-Nature Opposition // The Sociological Quarterly. – 2012. – Vol. 53, No. 4. – P. 506–523. – DOI: 10.1111/j.1533-8525.2012.01247.x.
5. Tarr J. A. The Metabolism of the Industrial City: The Case of Pittsburgh // Journal of Urban History. – 2002. – Vol. 28, No. 5. – P. 511–545. – DOI: 10.1177/009614420202800500l.
6. Zhang Y. Urban metabolism: A review of research methodologies // Environmental Pollution. – 2013. – Vol. 178. – P. 463–473. – DOI: 10.1016/j.envpol.2013.03.052.
7. Grönlund E., Fröling M., Skytt T. Energy, Emergy, and the City. Ecotechnology Working Paper 2016-1c [Электронный ресурс]. – Östersund: Mid Sweden University, 2016. – URL: https://miun.diva-portal.org/smash/get/diva2:937145/FULLTEXT01.pdf (дата обращения: 09.10.2026).
8. Zhang Y., Yang Z., Yu X. Ecological network and emergy analysis of urban metabolic systems: Model development, and a case study of four Chinese cities // Ecological Modelling. – 2009. – Vol. 220, No. 11. – P. 1431–1442. – DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.02.001.
9. Wolman A. The Metabolism of Cities // Scientific American. – 1965. – Vol. 213, No. 3. – P. 178–190. – DOI: 10.1038/scientificamerican0965-178.
10. Kennedy C. A., Pincetl S., Bunje P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design // Environmental Pollution. – 2011. – Vol. 159, No. 8–9. – P. 1965–1973. – DOI: 10.1016/j.envpol.2010.10.022.
11. Pincetl S., Bunje P., Holmes T. An expanded urban metabolism method: Toward a systems approach for assessing urban energy processes and causes // Landscape and Urban Planning. – 2012. – Vol. 107, No. 3. – P. 193–202. – DOI: 10.1016/j.landurbplan.2012.06.006.
12. Brunner P. H. Reshaping Urban Metabolism // Journal of Industrial Ecology. – 2007. – Vol. 11, No. 2. – P. 11–13. – DOI: 10.1162/jie.2007.1293.
13. Wang X., Li Y., Liu N., Zhang Y. An urban material flow analysis framework and measurement method from the perspective of urban metabolism // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 257. – Article 120564. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120564.
14. 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. – 2023. – Vol. 39. – P. 162–174. – DOI: 10.1016/j.spc.2023.05.017.
15. Geremicca F., Bilec M. M. Searching for new Urban Metabolism techniques: A review towards future development for a city-scale Urban Metabolism Digital Twin // Sustainable Cities and Society. – 2024. – Vol. 107. – Article 105445. – DOI: 10.1016/j.scs.2024.105445.
16. Tleuberdinova A. T., Nurlanova N. K., Alzhanova F. G., Kalmenov B. T. Three facets of urban metabolism (case of Kazakhstan) // International Journal of Urban Sustainable Development. – 2024. – Vol. 16, No. 1. – P. 182–198. – DOI: 10.1080/19463138.2024.2362631.
17. Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. Охрана окружающей среды в Республике Казахстан: статистический сборник. – Астана, 2025. – 156 с. – URL: https://stat.gov.kz/upload/iblock/2d7/istgebxi60xdul68xu535vonws84bfbk/%D0%A1-05-%D0%93%20%28%D1%80%D1%83%D1%81%29.pdf (дата обращения: 09.10.2026).
18. Акимат города Актау. Ақтау халқын ауыз сумен қамту мәселесі талқыланды [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/akimat-goroda-aktau/press/news/details/807098 (дата обращения: 09.10.2026).
19. Акимат Мангистауской области. Жаркая погода в Актау влияет на выработку питьевой воды – МАЭК [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/mangystau/press/news/details/809381?lang=ru (дата обращения: 09.10.2026).

References

1. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, A/RES/70/1. URL: https://sdgs.un.org/2030agenda (accessed: 09.10.2026).
2. Ob utverzhdenii Strategii dostizheniya uglerodnoi neitral'nosti Respubliki Kazakhstan do 2060 goda: Ukaz Prezidenta Respubliki Kazakhstan ot 2 fevralya 2023 goda № 121 [On approval of the Strategy for achieving carbon neutrality of the Republic of Kazakhstan until 2060]. Informatsionno-pravovaya sistema «Adilet». URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121 (accessed: 09.10.2026) (in Russian).
3. Marks K. Kapital. Kritika politicheskoi ekonomii. T. 1, kn. 1: Protsess proizvodstva kapitala [Capital. Critique of Political Economy. Vol. 1, Book 1: The Process of Production of Capital]. Moscow: Politizdat, 1978, 907 p. (in Russian).
4. Wachsmuth D. Three Ecologies: Urban Metabolism and the Society-Nature Opposition. *The Sociological Quarterly*, 2012, 53 (4), pp. 506–523. DOI: 10.1111/j.1533-8525.2012.01247.x.
5. Tarr J. A. The Metabolism of the Industrial City: The Case of Pittsburgh. *Journal of Urban History*, 2002, 28 (5), pp. 511–545. DOI: 10.1177/0096144202028005001.
6. Zhang Y. Urban metabolism: A review of research methodologies. *Environmental Pollution*, 2013, 178, pp. 463–473. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.03.052.
7. Grönlund E., Fröling M., Skytt T. Energy, Emergy, and the City. Ecotechnology Working Paper 2016-1c. Östersund: Mid Sweden University, 2016. URL: https://miun.diva-portal.org/smash/get/diva2:937145/FULLTEXT01.pdf (accessed: 09.10.2026).
8. Zhang Y., Yang Z., Yu X. Ecological network and emergy analysis of urban metabolic systems: Model development, and a case study of four Chinese cities. *Ecological Modelling*, 2009, 220 (11), pp. 1431–1442. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.02.001.
9. Wolman A. The Metabolism of Cities. *Scientific American*, 1965, 213 (3), pp. 178–190. DOI: 10.1038/scientificamerican0965-178.
10. Kennedy C. A., Pincetl S., Bunje P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, 2011, 159 (8–9), pp. 1965–1973. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.10.022.
11. Pincetl S., Bunje P., Holmes T. An expanded urban metabolism method: Toward a systems approach for assessing urban energy processes and causes. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 107 (3), pp. 193–202. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2012.06.006.
12. Brunner P. H. Reshaping Urban Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11 (2), pp. 11–13. DOI: 10.1162/jie.2007.1293.
13. Wang X., Li Y., Liu N., Zhang Y. An urban material flow analysis framework and measurement method from the perspective of urban metabolism. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257, Article 120564. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120564.
14. 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*, 2023, 39, pp. 162–174. DOI: 10.1016/j.spc.2023.05.017.
15. Geremicca F., Bilec M. M. Searching for new Urban Metabolism techniques: A review towards future development for a city-scale Urban Metabolism Digital Twin. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 107, Article 105445. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105445.
16. Tleuberdinova A. T., Nurlanova N. K., Alzhanova F. G., Kalmenov B. T. Three facets of urban metabolism (case of Kazakhstan). *International Journal of Urban Sustainable Development*, 2024, 16 (1), pp. 182–198. DOI: 10.1080/19463138.2024.2362631.
17. Byuro natsional'noi statistiki Agentstva po strategicheskomu planirovaniyu i reformam Respubliki Kazakhstan. Okhrana okruzhayushchei sredy v Respublike Kazakhstan: statisticheskii sbornik [Environmental Protection in the Republic of Kazakhstan: Statistical Collection]. Astana, 2025, 156 p. URL: https://stat.gov.kz/upload/iblock/2d7/istgebxi60xdul68xu535vonws84bfbk/%D0%A1-05-%D0%93%20%28%D1%80%D1%83%D1%81%29.pdf (accessed: 09.10.2026) (in Russian).
18. Akimat goroda Aktau. Aktau halkyn auyz sumen kamtu maselesi talkylandy [The issue of providing Aktau residents with drinking water was discussed]. 2024. URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/akimat-goroda-aktau/press/news/details/807098 (accessed: 09.10.2026) (in Kazakh).

19. Akimat Mangistauskoi oblasti. Zharkaya pogoda v Aktau vliyaet na vyrabotku pit'evoi vody – MAEK [Hot weather in Aktau affects drinking water production – MAEK]. 2024. URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/mangystau/press/news/details/809381?lang=ru (accessed: 09.10.2026) (in Russian).

ҚАЛАЛЫҚ МЕТАБОЛИЗМ ҮДЕРІСТЕРІН БАҒАЛАУДЫҢ ӘДІСТЕМЕЛІК ТӘСІЛДЕРІ

А.Ж. Панзабекова, А.Б. Жанбозова*

Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің Экономика институты, Алматы, Қазақстан

Түйін. *Мақалада Қазақстанның индустриялық қалаларындағы қалалық метаболизмді бағалаудың әдістемелік тәсілі ұсынылады. Материалдық және энергетикалық ағындар ресурс түрі, пайдалану саласы және қалалық жүйедегі қозғалыс кезеңі бойынша жүйеленіп, кіріс ағындарын, ішкі үдерістерді және шығыс ағындарын ажырату қағидаттары негізделеді. Ұсынылған тәсіл Ақтау қаласының 2020–2024 жылдардағы ластаушы заттар шығарындылары мен 2024 жылғы сумен жабдықтау деректері негізінде қарастырылды. Нәтижелер физикалық ағындарды қоршаған ортаның жай-күйі көрсеткіштерінен бөлек бағалау және қалалық статистика шектеулі жағдайда талдауды кезең-кезеңімен жүргізу қажеттігін көрсетті.*

Түйінді сөздер: *қалалық метаболизм, материалдық ағындар, энергетикалық ағындар, индустриялық қалалар, ресурстық тиімділік, экологиялық жүктеме, Ақтау.*

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING URBAN METABOLISM PROCESSES

A.Zh. Panzabekova, A.B. Zhanbozova*

Institute of Economics of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

Summary. *The article proposes a methodological approach to assessing urban metabolism in the industrial cities of Kazakhstan. Material and energy flows are classified by resource type, sphere of use, and stage of movement within the urban system, distinguishing inputs, internal processes, and outputs. The approach is examined using pollutant emission data for Aktau in 2020–2024 and water supply indicators for 2024. The findings highlight the importance of distinguishing physical flows from environmental quality indicators and applying a phased assessment when city-level statistical data are limited.*

Keywords: *urban metabolism, material flows, energy flows, industrial cities, resource efficiency, environmental pressure, Aktau.*

Информация об авторах:

Панзабекова Аксана Жакитжановна *– кандидат экономических наук, профессор, Институт экономики Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, Алматы, Казахстан, e-mail: aksanat@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6389-9637.*

Жанбозова Аксауле Болатхановна* *– PhD, Институт экономики Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, Алматы, Казахстан, e-mail: aksaulew@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7143-5680.*

Авторлар туралы ақпарат:

Панзабекова Аксана Жакитжанқызы *– экономика ғылымдарының кандидаты, профессор, Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің Экономика институты, Алматы, Қазақстан, e-mail: aksanat@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6389-9637.*

Жанбозова Ақсауле Болатханқызы* *– PhD, Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің Экономика институты, Алматы, Қазақстан, e-mail: aksaulew@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7143-5680.*

Information about the authors:

Aksana Zh. Panzabekova *– Candidate of Economic Sciences, Professor, Institute of Economics of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, e-mail: aksanat@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6389-9637.*

Aksaule B. Zhanbozova* *– PhD, Institute of Economics of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, e-mail: aksaulew@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7143-5680.*

Получено: 11.07.2026
Принято к рассмотрению: 12.08.2026
Доступно онлайн: 12.11.2026