

В статье на основе общей теории систем и кибернетики обоснован системный подход к проектированию инфраструктуры через взаимодействие природной, искусственной и социальной подсистем. Исследована проблема нормативного и институционального разрыва между развитием инженерных сетей и водно-зеленого каркаса в РФ. Опираясь на методологию системной инженерии, автор предлагает концепцию урбобиоценоза как модели сквозной синергетической оптимизации элементов городской среды. Предложены практические рекомендации, обеспечивающие технико-экономический эффект и климатическую адаптацию систем жизнеобеспечения сибирских агломераций.

Ключевые слова: системный подход; урбобиоценоз; городская инфраструктура; водно-зеленый каркас; интегрированное планирование; климатическая адаптация. /

Based on general systems theory and cybernetics, the article substantiates a systems approach to infrastructure design through the interaction of natural, artificial, and social subsystems. The author examines the problem of the regulatory and institutional gap between the development of conventional subsurface utility networks and the water-green framework in the Russian Federation. Drawing upon the methodology of systems engineering developed at MIT, the paper proposes the concept of urbobiocenosis as a model for the end-to-end synergetic optimization of urban environment elements. Practical recommendations are formulated to ensure resource efficiency and climate adaptation of life support systems in Siberian agglomerations.

Keywords: systems approach; urbobiocenosis; urban infrastructure; blue-green infrastructure; integrated planning; climate adaptation.

Системный подход к проектированию городской инфраструктуры / A systems approach to urban infrastructure design

текст

Алексей Козьмин

Сибирская лаборатория
урбанистики (Иркутск)

text

Alexey Kozmin

Siberian Urban Lab (Irkutsk)

Введение

В современной практике градостроительства Российской Федерации идет процесс институционализации «мастер-плана» как стратегического инструмента пространственного развития территорий. Данный формат проектирования призван обеспечить переход к более гибким моделям управления, учитывающим долгосрочные экономические и социальные тренды. Вместе с тем анализ обширного массива разработанных в последнее десятилетие документов стратегического планирования выявляет определенный дефицит комплексных инженерно-экологических решений. В частности, отмечается слабая взаимосвязь между проектированием централизованных систем жизнеобеспечения (инженерной инфраструктуры) и формированием природно-экологического пространства (водно-зеленого каркаса) городов.

С ретроспективной точки зрения советская градостроительная школа, базировавшаяся на разработке генеральных планов, обладала фундаментальной расчетно-инженерной основой. Городская среда рассматривалась как единый народнохозяйственный и технологический комплекс. Проектирование сетей водоснабжения, водоотведения, тепловых магистралей и систем отвода поверхностного стока детерминировалось геоморфологическими особенностями ландшафта, естественной гидрологической сетью и структурой зеленых насаждений, выполнявших, помимо прочего, санитарно-защитные и дренажные функции. Такой подход минимизировал риски системных сбоев инфраструктуры.

В современных реалиях, обусловленных рыночной трансформацией градостроительной деятельности, жесткая взаимосвязь между данными компонентами претерпела изменения. Сжатые сроки разработки проектной документации, влияние бюджетных циклов, а также объективный дефицит верифицированных исходных данных (включая актуальные цифровые модели рельефа, гидрологические ряды наблюдений и точные сведения о пространственном расположении существующих подземных коммуникаций), приводят к преобладанию визуально-пространственных и объемных решений над инженерно-технологическими. Инженерная инфраструктура зачастую рассчитывается изолированно в виде схем

мощностей, накладываемых на территорию на финальных стадиях проектирования, в то время как водно-зеленый каркас рассматривается преимущественно в рамках концепций благоустройства и ландшафтного дизайна [1].

Фрагментация проектного процесса снижает адаптивный потенциал городов перед лицом современных климатических вызовов, что особенно критично для урбанизированных территорий Сибири, Дальнего Востока и юга России. Преодоление данного методологического разрыва требует обращения к фундаментальным научным принципам общей теории систем и кибернетики для формирования концепции урбобиоценоза – управляемого симбиоза искусственных и естественных подсистем города.

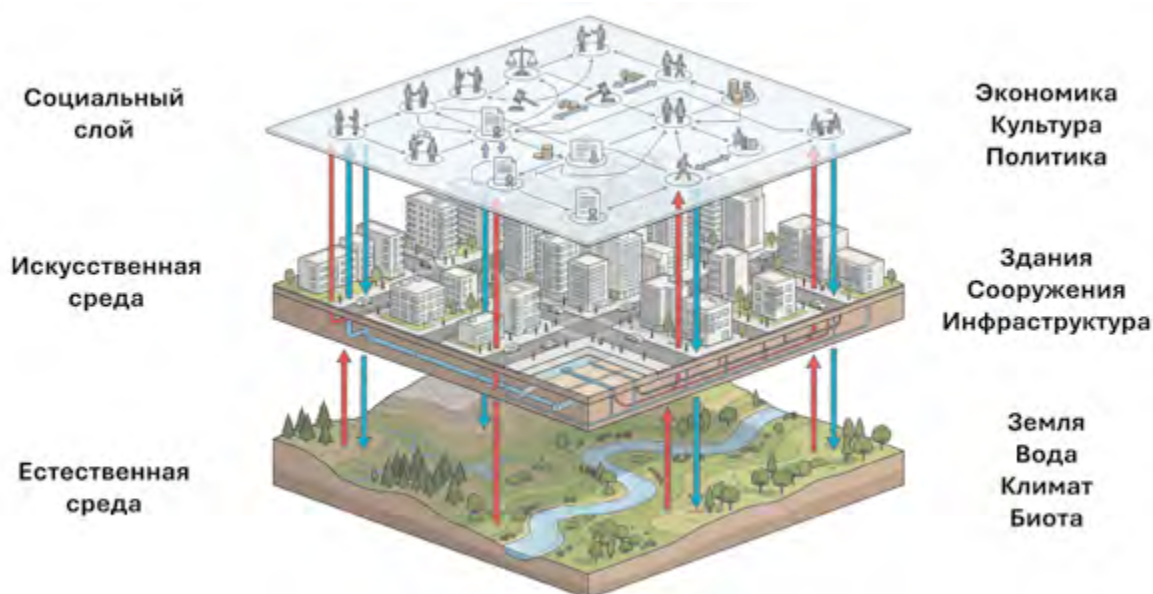
Город как система

С позиций общей теории систем Людвиг фон Бергаланфи [2] и кибернетических подходов Норберта Винера [3] город представляет собой сверхсложную, открытую, динамическую макросистему. Ее устойчивое функционирование обеспечивается непрерывным метаболическим обменом и информационным взаимодействием между тремя ключевыми подсистемами: природной средой, рукотворной техногенной средой, социальной средой [4].

Природная подсистема представляет собой фундаментальный слой макросистемы, включающий геоморфологическую основу, гидрологическую сеть, климатические параметры, почвенный контур и биоту. Данная подсистема определяет естественные условия и ресурсные ограничения развития поселения.

Под искусственной подсистемой понимается техногенный каркас, созданный в процессе урбанизации для обеспечения жизнедеятельности: здания и сооружения, дорожно-транспортная сеть и комплекс инженерных коммуникаций (тепло-, водо-, электроснабжение, водоотведение и т. п.).

Социальная подсистема есть совокупность демографических, экономических, институциональных и нормативно-правовых факторов. В данном контуре формируются целевые ориентиры и проекты развития (стандарты качества среды, документы территориального планирования, инвестиционные программы и т. п.), определяющие



< Рис. 1. Город как естественно-искусственная социальная система. Рисунок автора

развитие искусственной и использование природной подсистемы.

Системный кризис современного планирования заключается в попытке установления прямых линейных связей между социальной (запросы населения, показатели плотности застройки) и искусственной (объемы ввода жилья, пропускная способность сетей) подсистемами при изоляции или игнорировании функций природной подсистемы.

Концепция урбобиоценоза [5] предполагает целенаправленное проектирование интерфейса взаимодействия между природной и искусственной средой под управлением и в долгосрочных интересах социальной подсистемы. Линейные инженерные сети и компоненты водно-зеленого каркаса должны рассматриваться не как конкурирующие за пространственный ресурс элементы, а как комплементарные структуры, образующие единый биоклиматический и технологический организм.

Системная инженерия в международной практике интегрированного планирования

В международной академической и инженерной практике альтернативой фрагментарному проектированию выступает методология интегрированного городского планирования и системный подход к инфраструктуре. Глубокие исследования в данном направлении ведутся в Массачусетском технологическом институте (MIT), в частности в рамках Лаборатории инженерных систем и Института данных, систем и общества.

Исследователи MIT – профессор Оливье де Век, Аффин Сиддики и Джессика Трансик – определяют городскую инфраструктуру как «систему систем», что концептуально соответствует представленному в данной статье видению города как совокупности природной, искусственной и социальной подсистем.

О. де Век обосновывает необходимость проектирования инфраструктурных объектов с учетом параметров гибкости и способности к реконфигурации в условиях стохастических изменений внешней среды [6]. Статичное планирование крупномасштабных инженерных систем в условиях климатической нестабильности ведет к их ускоренному функциональному износу.

Применительно к урбанизированным территориям традиционные закрытые инженерные сети (например, бетонные коллекторы дождевой канализации) обладают жестко фиксированными параметрами пропускной способности. Системный подход требует децентрализации нагрузок посредством интеграции «серых» инженерных сетей с адаптивными элементами природной подсистемы (водно-зелеными массивами), выполняющими роль динамических буферов при экстремальных гидрологических нагрузках.

А. Сиддики специализируется на количественном анализе взаимосвязей в рамках триады: вода, энергия, продовольствие. Исследования доказывают высокую латентную энергоемкость процессов водоподготовки, транспортировки и очистки стоков в современных мегаполисах. «Проектирование городской среды без учета энергоемкости водного цикла и гидрологических процессов ведет к системным сбоям. Городская инфраструктура должна планироваться через сквозные модели оптимизации, где природные ландшафты выступают непосредственными участниками процессов фильтрации и удержания ресурсов, снижая механическую нагрузку на насосные станции и очистные сооружения» [7].

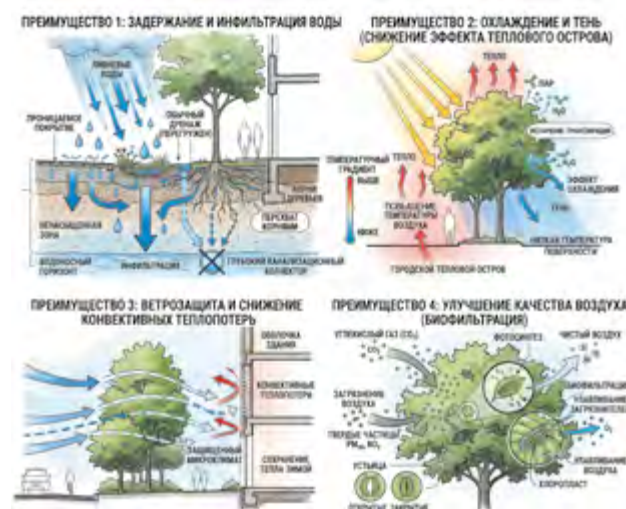
Развивая данные положения в контексте климатической устойчивости [8], автор доказывает, что водно-зеленый каркас должен рассчитываться как полнофункциональная инженерная подсистема, минимизирующая интенсивность городского метаболизма за счет эндогенных регенеративных функций экосистем.

Дж. Трансик разрабатывает предикативные математические модели для оценки долгосрочных экологических и экономических эффектов внедрения технологий. В ее работах математически доказано, что параметры пространственной морфологии города определяют интегральную энергоэффективность территории [9].

Интеграция природного каркаса трансформирует тепловой баланс урбанизированных поверхностей и нивелирует пиковые нагрузки на энергетические сети. Моделирование, выполненное под руководством Дж. Трансик, подтверждает, что превентивные инвестиции в пространственное распределение зеленых зон экономически более эффективны по сравнению с экстенсив-



^ Рис. 2. Пример инженерно-экологической инфраструктуры – линейный парк в г. Нинбо, Китай (https://www.gooood.cn/2016-asla-general-design-awards-eco-corridor-resurrects-former-brownfield-by-swa.htm?lang=zh_CN)



^ Рис. 3. Преимущества использования зеленого каркаса как объекта инженерно-экологической инфраструктуры. Рисунок автора

ным увеличением мощностей генерирующей и распределительной инфраструктуры [10].

Таким образом, методологический опыт MIT переводит дебаты о водно-зеленом каркасе из плоскости эстетического благоустройства в область расчетной системной инженерии.

Модель синергетической интеграции инфраструктурных систем в условиях РФ

Реализация концепции урбобиоценоза в Российской Федерации требует преодоления институциональных и нормативно-правовых барьеров, локализованных в социальной подсистеме, для достижения технологической синергии искусственной и природной среды.

В действующей нормативно-правовой базе РФ проектирование инженерной инфраструктуры и развитие водно-зеленого каркаса осуществляются в изолированных правовых режимах. Инженерная инфраструктура регламентируется Градостроительным кодексом РФ (ГрК РФ) и реализуется через отраслевые Схемы комплексного развития коммунальной инфраструктуры (СКРКИ), схемы электро-, тепло-, водоснабжения и водоотведения. Данные документы ориентированы преимущественно на экстенсивное наращивание мощностей закрытых коммуникаций.

Водно-зеленый каркас регулируется муниципальными правилами благоустройства (в рамках ФЗ № 131-ФЗ) и нормами градостроительного проектирования (СП 42.13330.2016), где зеленые насаждения учитываются как плоскостные показатели обеспеченности населения ($\text{м}^2/\text{чел}$) без верификации их средокреативных, гидрологических и климатических функций. Городские леса и лесопарковые зеленые пояса, в свою очередь, регулируются соответствующими статьями Лесного кодекса РФ и Федеральным законом № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» и рассматриваются как элемент природной экологической системы города без осмысления их роли как элемента единой инженерно-экологической системы.

Данная разобщенность приводит к межсистемным конфликтам: трассировка линейных объектов коммунальной инфраструктуры нередко нарушает целостность естественных гидрологических ложбин и лесных массивов, а закрытые системы дождевой канализации изоли-

руют поверхностный сток от почвенного слоя, вызывая аридизацию городских почв и одновременно локальные подтопления при превышении расчетных пиков осадков.

С целью минимизации ресурсных затрат и повышения климатической устойчивости российских городов предлагается к внедрению комплекс организационно-технических мероприятий:

- Легитимизация понятия «зеленая инфраструктура». Необходима имплементация в ГрК РФ типологии объектов водно-зеленого каркаса (дождевых садов, биодренажных систем, элементов устойчивых дренажных систем) в качестве объектов инженерно-экологической инфраструктуры. Данная мера позволит осуществлять целевое финансирование их сооружения и эксплуатации за счет средств инвестиционных программ и национальных проектов, касающихся развития городской инфраструктуры.

- Синхронизация документов пространственного и отраслевого планирования. Мастер-план должен выступать в качестве координирующего документа верхнего уровня, фиксирующего границы «экологических коридоров» и накладывающего ограничения на прокладку традиционных подземных коммуникаций. Разработка отраслевых схем водоснабжения и водоотведения должна осуществляться на основе результатов предварительного гидрологического моделирования ландшафта.

- Децентрализация и биофильтрация поверхностного стока. Интеграция каскадов биодренажных каналов и дождевых садов в структуру улично-дорожной сети (УДС) обеспечивает удержание до 70–80% пикового объема поверхностного стока. Капитальные затраты на создание распределенных природных дренажных систем в среднем на 30–40% ниже стоимости прокладки подземных коллекторов глубокого заложения, при этом существенно снижается гидравлическая нагрузка на конечные очистные сооружения.

- Утилизация низкопотенциального тепла линейных объектов. В условиях Сибири подземные тепловые сети генерируют тепловые потери, формируя локальные зоны таяния грунтов. Системное проектирование позволяет формировать вдоль охранных зон теплотрасс (с соблюдением нормативных технологических разрывов) фитоценозы со специфической поверхностной корневой системой. Данные насаждения утилизируют избыточ-

ное тепло для пролонгации вегетационного периода, активизируя процессы транспирации. В свою очередь, плотный растительный покров снижает глубину промерзания грунта над инженерными сетями в зимний период, минимизируя аварийность.

– Замкнутые циклы водооборота. Согласно методологии А. Сиддики, очищенные «серые» стоки жилой застройки могут быть децентрализованно направлены для подпитки искусственных водно-болотных угодий, интегрированных в городскую ткань. Это обеспечивает естественную доочистку стоков и поддерживает гидрологический баланс рекреационных зон без привлечения дополнительных водных ресурсов.

Для крупных городских агломераций Сибири (Новосибирск, Красноярск, Иркутск, Томск), характеризующихся резко континентальным климатом, реализация концепции урбобиоценоза обеспечивает синергетический эффект:

– В зимний период: структурированный ветрозащитный зеленый каркас снижает скорость воздушных потоков в контурах жилой застройки, что, согласно термодинамическим моделям теплопотерь зданий Дж. Трансик, позволяет сократить удельный расход тепловой энергии на отопление на 10–12%.

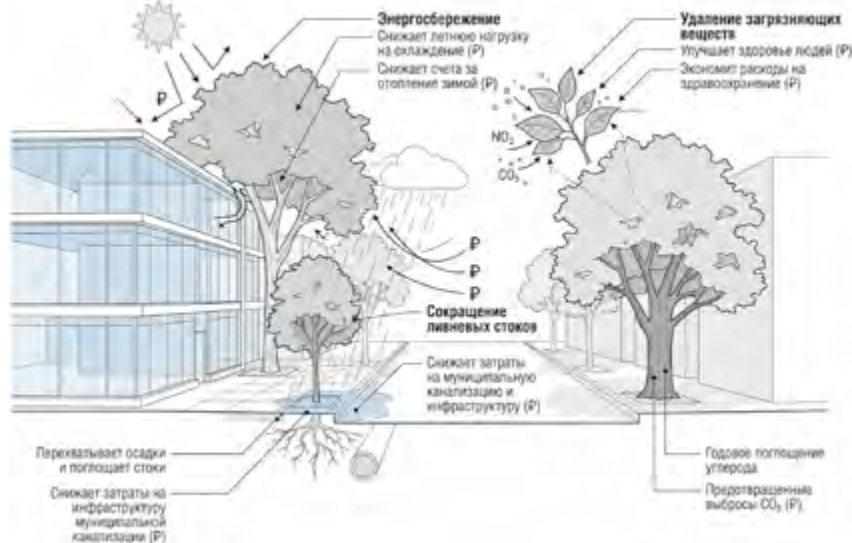
– В летний период: интенсивное испарение влаги элементами водно-зеленого каркаса снижает выраженность городского «теплого острова» (при летних температурных пиках до 35 °C), что минимизирует риски деградации дорожных покрытий и снижает пиковые нагрузки на распределительные электрические сети за счет сокращения энергопотребления системами кондиционирования.

Заключение

Переход от фрагментарного ландшафтного благоустройства к превентивному проектированию урбобиоценоза на основе взаимодействия природной, искусственной и социальной подсистем является необходимым условием обеспечения устойчивости городской среды в Российской Федерации. Синтез отечественных традиций комплексного инженерного анализа и современных международных методологий системной инженерии открывает возможности для перевода городского хозяйства на принципиально новый технологический уровень. Водно-зеленый каркас и инженерные коммуникации должны проектироваться как коэволюционирующая инженерно-экологическая система, способная оптимизировать эксплуатационные затраты и обеспечить защищенность городского населения в условиях долгосрочных климатических изменений.

Литература

1. Козьмин, А. Глобальная повестка городского развития и ее актуальность в России // Проект Байкал. – 2026. – № 23 (87). – DOI: 10.51461/issn.2309-3072/87.2729
2. Берталанфи, Л. фон. Общая теория систем – обзор проблем и результатов // Системные исследования: Ежегодник. – Москва : Наука, 1969. – С. 30–54.
3. Винер, Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине / Пер. с англ. – 2-е изд. – Москва : Наука, 1983. – 344 с.
4. Козьмин, А. П. Системный подход к проектированию как залог успешной реализации проекта // Материалы 27-й сессии Международного Байкальского Зимнего университета урбанистики. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2026.
5. Перелыгин, Ю. Типология урбобиоценоза // Управление развитием территории. – URL: <https://urtmag.ru/public/1331> (дата обращения: 27.05.2026).
6. Ferguson, S., Siddiqi, A., Weck, O. de Flexible and reconfigurable systems: Nomenclature and review // ASME 2007. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. – 2007. – Vol. 5. – P. 321–332. – DOI: 10.1115/DETC2007-35324



7. Siddiqi A., de Weck O. L. Quantifying End-Use Energy Intensity in the Urban Water Cycle // Journal of Infrastructure Systems. – 2013. – Vol. 19, N4. – P. 474–485. – DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.00001053

8. Siddiqi, A., Weck, O. L. de Integrating portfolios for managing water-energy-food nexus: Co-evaluation of infrastructure utility and resource security // Environmental Science & Policy. – 2022. – Vol. 129. – P. 11–22. – DOI: 10.1016/j.envsci.2021.12.010

9. Trancik, J. E. Renewable energy: Forecasts and data-informed models for technological change // Nature Climate Change. – 2014. – Vol. 4, N 11. – P. 950–952. – DOI: 10.1038/nclimate2415

10. Trancik, J. E., Green-Weiskel, L. An integrated approach to urban infrastructure planning: Balancing data, design, and environmental systems // MIT Institute for Data, Systems, and Society (IDSS) Working Paper Series. – 2021. – IDSS-WP-2021-04

References

- Bertalanfy, L. von (1969). General system theory: A Survey. In *System research: Yearbook* (pp. 30–54). Nauka.
- Ferguson, S., Siddiqi, A., & de Weck, O. (2007). Flexible and reconfigurable systems: Nomenclature and review. *Proceedings of IDETC/CIE 2007 ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 5, pp. 321–332). DOI: 10.1115/DETC2007-35324
- Kozmin, A. P. (2026a). Sistemnyi podkhod k proektirovaniyu kak zalog uspešnoi realizatsii proekta [A systematic approach to design as the key to successful project implementation]. *Proceedings of the 27th session of the International Baikal Winter University of Urban Planning Design*. IRNTU.
- Kozmin, A. (2026b). The global urban agenda and its relevance in Russia. *Project Baikal*, 23(87), 10–14. <https://doi.org/10.51461/issn.2309-3072/87.2729>
- Perelygin, Yu. (2022). *Tipologiya urbobiotsenoza [Typology of urban biocenosis]*. Territory development management. Retrieved May 27, 2026, from <https://urtmag.ru/public/1331>
- Siddiqi A., & de Weck, O. L. (2013). Quantifying End-Use Energy Intensity in the Urban Water Cycle. *Journal of Infrastructure Systems*, 19(4), 474–485. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000153
- Siddiqi, A., & de Weck, O. L. (2022). Integrating portfolios for managing water-energy-food nexus: Co-evaluation of infrastructure utility and resource security. *Environmental Science & Policy*, 129, 11–22. DOI: 10.1016/j.envsci.2021.12.010
- Trancik, J. E. (2014). Renewable energy: Forecasts and data-informed models for technological change. *Nature Climate Change*, 4(11), 950–952. DOI: 10.1038/nclimate2415
- Trancik, J. E., & Green-Weiskel, L. (2021). An integrated approach to urban infrastructure planning: Balancing data, design, and environmental systems. In *MIT Institute for Data, Systems, and Society (IDSS) Working Paper Series*. IDSS-WP-2021-04.
- Wiener, N. (1983). *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine* (I. V. Solovyov & G. N. Povarov, Trans.; G. N. Povarov, Ed.) (2nd ed.). Nauka.

^ Рис. 4. Принципиальная схема экономических эффектов зеленого каркаса города. Рисунок автора