

БИОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ЛЕЧЕБНОЙ СРЕДЫ В ТУБЕРКУЛЕЗНЫХ СТАЦИОНАРАХ

Irina Vagifovna Gabibova,
PhD in Architecture, Acting Professor
KIMYO INTERNATIONAL UNIVERSITY in TASHKENT,
Department of Architecture and Urban Design,
Tashkent, Uzbekistan
irina.gabibova@mail.ru
<https://doi.org/10.5281/zenodo.19845376>

Abstract. Tuberculosis hospitals represent one of the most challenging building types in healthcare architecture due to strict sanitary requirements, airborne infection control, and the need to create a high-quality therapeutic environment. This study examines the role of bioclimatic design in the design of therapeutic spaces in tuberculosis hospitals.

The study combines architectural planning analysis, climate modeling, ventilation calculations, and energy efficiency assessment. A conceptual bioclimatic model of a tuberculosis hospital is proposed, combining passive microclimate control strategies, adaptive microclimate control, and spatial organization.

The results show that bioclimatic solutions improve indoor air quality, promote patient recovery, and reduce energy consumption by 30–40% compared to traditional hospital design.

The study contributes to healthcare architecture by proposing an integrated framework for the design of sustainable infectious disease hospitals and establishing quantitative metrics for assessing bioclimatic performance. Key words: bioclimatic design, tuberculosis hospitals, treatment environment, sustainable healthcare architecture, ventilation, energy efficiency.

Key words: bioclimatic design, tuberculosis hospitals, treatment environment, sustainable healthcare architecture, ventilation, energy efficiency.

Аннотация. Туберкулезные больницы представляют собой один из наиболее сложных типов зданий в архитектуре здравоохранения из-за строгих санитарных требований, контроля распространения инфекций воздушно-капельным путем и необходимости создания высококачественной лечебной среды. В исследовании рассматривается роль биоклиматического проектирования в формировании терапевтических пространств в туберкулезных стационарах.

Исследование объединяет анализ архитектурного планирования, климатическое моделирование, расчеты вентиляции и оценку энергоэффективности. Предложена концептуальная биоклиматическая модель туберкулезной больницы, сочетающая пассивные стратегии управления микроклиматом, адаптивное микроклиматическое управление и пространственную организацию.

Результаты показывают, что биоклиматические решения улучшают качество воздуха в помещении, способствуют выздоровлению пациентов и снижают энергопотребление на 30–40% по сравнению с традиционным проектированием больниц.

Исследование вносит вклад в архитектуру здравоохранения, предлагая интегрированную структуру для проектирования устойчивых инфекционных больниц и устанавливая количественные показатели для оценки биоклиматической эффективности.

Ключевые слова: биоклиматическое проектирование, туберкулезные больницы, лечебная среда, устойчивая архитектура здравоохранения, вентиляция, энергоэффективность.

Xulosa. Sil kasalxonalari sog'liqni saqlash arxitekturasida eng qiyin bino turlaridan birini ifodalaydi, chunki ular qat'iy sanitariya talablari, havo orqali yuqadigan infeksiyani nazorat qilish

va yuqori sifatli terapevtik muhit yaratish zarurati bilan bog'liq. Ushbu tadqiqot sil kasalxonalarida terapevtik makonlarni loyihalashda bioiklim dizaynining rolini o'rganadi.

Tadqiqot arxitektura rejalashtirish tahlili, iqlim modellashtirish, shamollatish hisob-kitoblari va energiya samaradorligini baholashni birlashtiradi. Passiv mikroiklimni boshqarish strategiyalari, moslashuvchan mikroiklimni boshqarish va fazoviy tashkil etishni birlashtirgan sil kasalxonasining kontseptual bioiklim modeli taklif qilingan.

Natijalar shuni ko'rsatadiki, bioiklim yechimlari ichki havo sifatini yaxshilaydi, bemorlarning sog'ayishiga yordam beradi va an'anaviy kasalxona dizayniga nisbatan energiya sarfini 30-40% ga kamaytiradi.

Tadqiqot barqaror yuqumli kasalliklar kasalxonalarini loyihalash uchun integratsiyalashgan asosni taklif qilish va bioiklim ko'rsatkichlarini baholash uchun miqdoriy ko'rsatkichlarni yaratish orqali sog'liqni saqlash arxitekturasiga hissa qo'shadi.

Kalit so'zlar: bioiklim dizayni, sil kasalxonalari, davolash muhiti, barqaror sog'liqni saqlash arxitekturasini, shamollatish, energiya samaradorligi.

Введение. В начале XXI века инфекционные заболевания легких остаются одной из наиболее серьезных глобальных угроз общественному здоровью. Пандемия COVID-19, вспышки высокопатогенных респираторных инфекций (SARS, MERS)¹, а также постоянное присутствие туберкулёза, устойчивых к антибиотикам бактериальных инфекций (включая ESKAPE-группу)² и внутрибольничных инфекций (healthcare-associated infections, HAIs)³ подчёркивают уязвимость современных систем здравоохранения. При этом доказано, что параметры среды - освещение, вентиляция, температурно-влажностный режим, наличие природных компонентов - оказывают прямое влияние на скорость восстановления пациентов, уровень стресса, а также распространение внутрибольничных инфекций.

По данным ВОЗ⁴, ежегодно в мире регистрируется миллионы случаев нозокомиальных инфекций⁵, которые значительно увеличивают смертность, длительность госпитализации и экономические затраты. Архитектура больниц играет ключевую роль в этой динамике: традиционные стационары, спроектированные без учёта современных эпидемиологических вызовов, часто способствуют распространению патогенов через неэффективную вентиляцию, скученность, недостаток естественного освещения и слабый контроль воздушных потоков. Современные исследования в области архитектуры здравоохранения всё чаще рассматривают лечебную среду как комплексный феномен, объединяющий пространственные, климатические, экологические и психологические факторы.

В этой связи особую значимость приобретает биоклиматический подход, основанный на использовании природных условий, адаптации архитектуры к климату,

¹ **SARS и MERS** — это тяжелые, потенциально смертельные респираторные инфекции, вызванные коронавирусами. **SARS (ТОРС):** «Тяжелый острый респираторный синдром» (SARS-CoV), пандемия 2002–2004 годов. **MERS (БВРС):** «Ближневосточный респираторный синдром» (MERS-CoV), выявлен в 2012 году, часто передается от верблюдов.

² **Группа ESKAPE** — это шесть патогенов (*Enterococcus faecium*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterobacter spp.*), обладающих высокой лекарственной устойчивостью и часто вызывающих опасные госпитальные инфекции.

³ **Внутрибольничные инфекции (healthcare-associated infections, HAIs)** - инфекции, связанные с оказанием медицинской помощи (**ИСМП/HAIs**) — это любые клинически выраженные микробные заболевания, поражающие пациента в результате его лечения или пребывания в стационаре, а также инфекции персонала, возникшие в ходе работы.

⁴ **ВОЗ- Всемирная** организация здравоохранения. Она является специализированным учреждением ООН, созданным в 1948 году, которое координирует международные усилия в области общественного здравоохранения, разрабатывает стандарты здоровья и помогает странам бороться с болезнями.

⁵ **Нозокомиальные (внутрибольничные или госпитальные) инфекции** — это любые клинически выраженные инфекционные заболевания, приобретенные пациентом в результате пребывания в лечебном учреждении, а также инфекции персонала, полученные при профессиональной деятельности.

внедрении пассивных стратегий энергосбережения и формировании устойчивых микроклиматических решений.

Биоклиматическое проектирование медицинских зданий предполагает оптимизацию ориентации корпусов, естественной инсоляции, воздушных потоков, зелёной инфраструктуры и переходных пространств. В инфекционных стационарах такие решения позволяют одновременно снижать энергопотребление, повышать санитарную безопасность и улучшать психологический комфорт пациентов.

Несмотря на рост числа исследований в области устойчивой архитектуры, биоклиматические стратегии в медицинских зданиях чаще рассматриваются фрагментарно - либо как часть энергоэффективности, либо как элемент экологического дизайна. Комплексное рассмотрение биоклиматических факторов именно в контексте инфекционных стационаров остаётся недостаточно разработанным, особенно в условиях континентального и жаркого климата.

Таким образом, возникает необходимость формирования научно обоснованной методологии, объединяющей архитектурно-планировочные, климатические и инженерные решения в единую систему формирования лечебной среды инфекционных стационаров.

Особое значение приобретает среда стационара в лечении и профилактике внутрибольничных инфекций. Физическая среда больницы выступает не только фоном, но и активным фактором передачи возбудителей - через воздух (аэрозольный и капельный пути), контактные поверхности, водные системы и даже строительные материалы. Многолетние исследования показывают, что до 20–40% нозокомиальных инфекций в определённых условиях связаны именно с недостатками среды: низкой кратностью воздухообмена, рециркуляцией загрязнённого воздуха, отсутствием направленного отрицательного давления в боксах, накоплением патогенов на поверхностях и в системах кондиционирования. В инфекционных стационарах, где концентрируются пациенты с высокой инфекционной нагрузкой, эти риски многократно возрастают, превращая лечебное учреждение из места выздоровления в потенциальный источник распространения инфекции - как среди пациентов, так и среди медицинского персонала.

Именно здесь проявляется значение **биоклиматического проектирования (bioclimatic design)** - подхода, который интегрирует местные климатические характеристики, естественные процессы вентиляции, освещения и теплового баланса для создания комфортной, энергоэффективной и, главное, эпидемиологически безопасной среды. Биоклиматические принципы позволяют максимально использовать естественную вентиляцию (особенно в регионах с благоприятными ветровыми и температурными режимами), контролировать направление и скорость воздушных потоков, минимизировать зоны застоя воздуха, обеспечивать высокий уровень естественного ультрафиолетового облучения (которое губительно для многих патогенов), а также снижать зависимость от энергоёмких механических систем кондиционирования, которые при неправильной эксплуатации сами становятся источником контаминации⁶ (например, легионеллёз, аспергиллёз).

В условиях инфекционных стационаров биоклиматический подход способен существенно снизить риск аэрозольной передачи, особенно при воздушно-капельных инфекциях, и одновременно способствовать психологическому комфорту пациентов и персонала. Стационары фтизиатрии и пульмонологии являются одним из наиболее сложных типов медицинских зданий с точки зрения архитектурного проектирования, инженерного обеспечения и формирования лечебной среды. Высокие требования к санитарно-гигиеническим условиям, контролю распространения аэрозольных инфекций, микроклимату и безопасности пациентов и персонала формируют необходимость поиска новых пространственных и технологических решений.

⁶ **Контаминация** (от лат. *contaminatio* - смешение) — это процесс загрязнения, смешения или объединения разнородных элементов в единое целое.

Современные научные подходы к проектированию лечебных сред активно развиваются в двух взаимосвязанных направлениях. С одной стороны, это инженерно-технологические решения: стандарты ASHRAE⁷, рекомендации ВОЗ по естественной вентиляции в медицинских учреждениях, гибридные системы (natural + mechanical ventilation), использование HEPA-фильтров, UVC-обеззараживания и направленного воздушного потока.

С другой стороны - архитектурно-планировочные стратегии: зонирование «чистых» и «грязных» потоков, одно- и двухкоридорные системы, глубинные планы корпусов, обеспечивающие сквозное проветривание, адаптивные фасады, атриумы и ветровые башни. Значительный вклад внесли работы по адаптации больниц после вспышек SARS (2003), MERS и особенно COVID-19, где акцент делался на гибкость планировки, возможность быстрого перепрофилирования и усиление естественного воздухообмена.

Несмотря на накопленный массив данных, в области биоклиматического проектирования инфекционных стационаров сохраняется заметный исследовательский разрыв. Большинство публикаций сосредоточено либо на чисто инженерных аспектах (вентиляция, фильтрация, давление), либо на общих принципах инфекционного контроля без глубокой привязки к локальным климатическим условиям. Мало исследований посвящено комплексному биоклиматическому подходу именно в инфекционных корпусах в условиях жаркого/сухого, континентального или субтропического климата (включая Центральную Азию), где естественная вентиляция может быть эффективным, но требует тщательного контроля для предотвращения перекрестного заражения.

Ещё меньше работ оценивают долгосрочное влияние таких решений на снижение заболеваемости нозокомиальными инфекциями в реальных стационарах, особенно с учётом энергозатрат, эксплуатационных рисков и адаптации к изменяющемуся климату. Практически отсутствуют сравнительные исследования эффективности биоклиматических и чисто механических систем в инфекционных отделениях в постпандемийный период.

Цель статьи - раскрыть потенциал биоклиматических подходов в формировании лечебной среды инфекционных стационаров как инструмента снижения риска внутрибольничных инфекций при одновременном обеспечении энергоэффективности и комфорта.

Анализ научных публикаций показал следующее:

1. Биоклиматические подходы преимущественно рассматриваются в жилой и общественной архитектуре, но редко — в специализированных инфекционных стационарах.
2. Исследования медицинских зданий сосредоточены на инженерных системах (вентиляция, фильтрация), без комплексной интеграции архитектурных решений.
3. Недостаточно разработаны модели лечебной среды, учитывающие:
 - климат региона,
 - поведенческие сценарии пациентов,
 - пространственную организацию инфекционных потоков,
 - экологическую устойчивость.

Актуальные исследования показывают, что архитектурные решения и системы вентиляции играют критическую роль в контроле распространения аэрозольных инфекций в лечебных учреждениях. Модели естественной вентиляции в ожидальных и консультативных зонах существенно повышают воздухообмен, снижая риск передачи

⁷ **Стандарты ASHRAE** — это общепризнанные на международном уровне нормы и руководства, разработанные Американским обществом инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха. Они регламентируют проектирование, эксплуатацию, энергоэффективность зданий, качество воздуха, а также безопасность хладагентов.

туберкулёза среди пациентов и персонала, а увеличение кратности воздухообмена (ACH)⁸ с 5–11 до 15–66 обеспечивает до 72 % снижение моделируемого риска инфекции.

Современные инженерные решения сочетают активные (высокоэффективные HVAC с рекуперацией, LED-освещение, AI-оптимизация) и пассивные методы.

В инфекционных стационарах сделан акцент на гибридных системах: естественная вентиляция в неэпидемический период + механическая вентиляция с фильтрацией и отрицательным давлением при необходимости.

Актуальные исследования показывают, что архитектурные решения и системы вентиляции играют критическую роль в контроле распространения аэрозольных инфекций в лечебных учреждениях. Модели естественной вентиляции в ожидальных и консультативных зонах существенно повышают воздухообмен, снижая риск передачи туберкулёза среди пациентов и персонала - увеличение кратности воздухообмена (ACH) с 5–11 до 15–66 обеспечивает до 72 % снижение моделируемого риска инфекции.

Обзор современных стратегий вентиляции показывает, что интеграция естественной и механической вентиляции совместно с HEPA-фильтрацией⁹, UVGI¹⁰ и гибридными системами даёт более устойчивые решения для инфекционных отделений, чем отдельное использование традиционных систем HVAC¹¹.

Критический обзор концепции биофильного дизайна показывает, что она развивается от простого включения зелёных элементов к более сложным методам интеграции природы на уровне формы, материала и пользовательского опыта.

Термин **biophilic design** описывает архитектурные концепции, которые интегрируют природные элементы для улучшения благополучия пациентов и персонала. По мнению исследователей, такие стратегии способны снижать уровень стресса, ускорять восстановление пациентов и улучшать общую среду лечебных зданий.

В ряде исследований подчеркивается важность включения натуральных факторов (вид из окна, растения, природный свет) не только для комфорта, но и как терапевтического элемента лечебной среды.

Рецензируемые обзоры связывают параметры внутренней среды — вентиляцию, температуру, относительную влажность, качество воздуха, а также доступ к дневному свету с медицинскими исходами пациентов и распространением внутрибольничных инфекций.

Обобщающие данные свидетельствуют, что оптимизация IEQ¹² способствует снижению инфекционных рисков, уменьшению стресса пациентов и сокращению времени лечения. Недавние обзорные исследования подчеркивают комплексность требований к устойчивым и энергоэффективным медицинским зданиям. Пассивные стратегии - ориентация корпуса, теплоизоляция, рекуперация тепла, солнечные системы - становятся

⁸ Увеличение кратности воздухообмена (ACH — Air Changes per Hour) — это повышение интенсивности обновления воздуха, при которой весь его объем в помещении замещается свежим 1 или более раз в час. Это необходимо для удаления загрязнений, влаги и избыточного тепла. Достигается установкой мощной механики, бризеров, чисткой каналов или увеличением естественного притока (окна).

⁹ HEPA-фильтрация (High Efficiency Particulate Air) — это высокоэффективная очистка воздуха, задерживающая не менее 99,97% микрочастиц размером от 0,3 мкм (пыль, пыльца, бактерии, аллергены). Фильтры изготавливаются из хаотично расположенных волокон, сложенных «гармошкой», и работают за счет эффектов зацепления, инерции и диффузии.

¹⁰ Система UVGI (ультрафиолетовое бактерицидное облучение) — это метод дезинфекции, использующий коротковолновый свет (UV-C) (обычно 254 нм) для уничтожения или инактивации микроорганизмов (бактерий, вирусов, плесени). UVGI-системы применяются для очистки воздуха в системах вентиляции, обеззараживания верхних уровней помещений и воды

¹¹ Традиционные системы HVAC (отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха) — это комплексное инженерное решение для поддержания комфортного микроклимата (температуры, влажности, чистоты воздуха) в зданиях. Они объединяют котел/печь для нагрева, кондиционер для охлаждения, воздуховоды и вентиляцию в единую сеть, управляемую централизованно.

¹² Оптимизация качества внутренней среды (IEQ — Indoor Environmental Quality) направлена на создание комфортных и здоровых условий внутри зданий за счет регулирования качества воздуха (IAQ), теплового комфорта, освещения и акустики. Она включает использование энергоэффективных систем ОВК, экологических материалов, правильного освещения и внедрение автоматизированных систем контроля.

ключевыми факторами для снижения энергопотребления в стационарах, особенно в жарких климатах.

Кроме того, рецензируемые публикации показывают, что энергия и комфорт должны быть сбалансированы: направление потоков воздуха, ориентация стен и окон, а также выбор материалов напрямую влияют на IEQ и эксплуатационные затраты.

Концепция evidence-based design (EBD)¹³ предполагает, что архитектурные решения должны основываться на научных данных и эмпирических результатах, особенно в области здравоохранения. В контексте **hospital design EBD¹⁴** позволяет установить связь между физической средой и исходами пациентов, снижая риски, повышая безопасность и улучшая качество обслуживания.

Концепция EBD играет центральную роль в понимании того, как параметры дизайна, такие как доступ к природному свету, вид на природу, вентиляция и тепловой комфорт, влияют на психофизиологическое состояние пациентов и персонала, что особенно важно для инфекционных больниц. Биоклиматическая архитектура ориентирована на максимальное использование природных факторов (солнечная радиация, ветер, температура наружного воздуха, влажность) для создания комфортной внутренней среды при минимизации энергопотребления. В контексте медицинских зданий пассивные стратегии приобретают особое значение, поскольку позволяют снижать нагрузку на инженерные системы без ущерба для гигиенических требований.

Пассивные стратегии включают:

- оптимальную ориентацию здания и помещений по сторонам света для максимального использования солнечного тепла зимой и защиты от перегрева летом;
- применение солнцезащитных устройств (навесы, жалюзи, глубокие свесы, перфорированные экраны);
- использование тепловой массы ограждающих конструкций для стабилизации температуры;
- естественную вентиляцию через грамотно расположенные проемы, аэрационные фонари и атриумы;
- озеленение и ландшафтный дизайн для создания микроклимата (затенение, ветрозащита, испарительное охлаждение).

Природно-ориентированные решения (biophilic design) дополняют пассивные подходы элементами прямого контакта с природой: внутренние зеленые пространства, видовые проемы на ландшафт, использование натуральных материалов и воды. В больницах такие элементы способствуют снижению стресса пациентов и персонала, ускорению восстановления и повышению психологического комфорта.

В ряде исследований подчеркивается важность включения натуральных факторов (вид из окна, растения, природный свет) не только для комфорта, но и как терапевтического элемента лечебной среды. Критический обзор концепции биофилического дизайна показывает, что она развивается от простого включения зелёных элементов к более сложным методам интеграции природы на уровне формы, материала и пользовательского опыта. В литературе отмечается успешное применение биоклиматических принципов в обычных стационарах (например, использование пассивного солнечного нагрева, естественного освещения и вентиляции в проектах в разных климатических зонах).

¹³ **Концепция Evidence-Based Design (EBD, доказательный дизайн)** — это подход к проектированию зданий, при котором архитектурные решения базируются на авторитетных научных исследованиях, данных и доказанной эффективности для достижения наилучших результатов. Она направлена на улучшение здоровья, безопасности и комфорта пользователей через создание «поддерживающей» среды.

¹⁴ **Доказательное проектирование (Evidence-Based Design, EBD) в дизайне больниц** — это использование научных исследований для принятия проектных решений с целью улучшения результатов лечения пациентов, повышения безопасности и эффективности персонала. EBD трансформирует медучреждения в лечущую среду, снижая стресс и риски инфекций. Ключевые элементы включают естественное освещение, снижение шума, эргономику и удобные для пациентов зоны

Однако в инфекционных отделениях пассивные стратегии часто вступают в конфликт с необходимостью строгого контроля воздушных потоков и предотвращения перекрестного заражения. Лечебная среда в инфекционных больницах формируется под влиянием нескольких ключевых факторов: света, воздуха и микроклимата, которые напрямую воздействуют как на физическое выздоровление, так и на **психологический комфорт** пациентов. Естественное освещение снижает уровень стресса, улучшает циркадные ритмы, способствует синтезу витамина D и ускоряет выздоровление.

В инфекционных боксах и палатах оно ограничено требованиями изоляции, однако грамотная организация окон (с учетом ориентации и солнцезащиты) позволяет сохранять терапевтический эффект без нарушения санитарных норм.

Влияние воздуха и микроклимата. Качество воздуха — критический фактор предотвращения внутрибольничных инфекций. Исследования показывают, что высокие кратности воздухообмена ($\geq 12\text{--}24$ АСН в боксах) существенно снижают риск аэрозольной передачи. Естественная вентиляция демонстрирует эффективность в снижении концентрации возбудителей (в том числе при туберкулезе, кори, SARS), особенно при организации направленного потока «снизу вверх» (displacement ventilation).

Однако в жарком влажном климате или при высоком уровне наружного загрязнения она требует тщательного контроля. Механическая вентиляция с HEPA-фильтрами и отрицательным давлением остается стандартом для изоляторов, но гибридные и смешанные режимы рассматриваются как перспективные.

Недавние обзорные исследования подчеркивают комплексность требований к устойчивым и энергоэффективным медицинским зданиям. Пассивные стратегии - ориентация корпуса, теплоизоляция, рекуперация тепла, солнечные системы - становятся ключевыми факторами для снижения энергопотребления в стационарах, особенно в жарких климатах.

Кроме того, рецензируемые публикации показывают, что энергия и комфорт должны быть сбалансированы: направление потоков воздуха, ориентация стен и окон, а также выбор материалов напрямую влияют на IEQ и эксплуатационные затраты.

Психологический комфорт пациентов. Изоляция усиливает чувство одиночества и тревоги. Доступ к естественному свету, видам на природу, зеленым элементам внутри помещений, акустический комфорт и ощущение «домашней» атмосферы значительно улучшают эмоциональное состояние. В постпандемийный период подчеркивается роль биофильного дизайна и healing landscapes даже в условиях строгой изоляции.

Медицинские учреждения — одни из самых энергоемких зданий (в 2–2,5 раза выше, чем офисы). Международные практики фокусируются на снижении углеродного следа при сохранении высокого уровня безопасности и комфорта.

Международные практики включают:

- сертификацию по LEED, BREEAM¹⁵, Passive House (применяется в реабилитационных и общих больницах, реже — в инфекционных);
- использование возобновляемых источников (солнечные панели, геотермальные системы);
- энергоэффективные оболочки зданий, умные системы управления (BMS);
- минимизацию отходов, рециклинг, устойчивое водопользование.

Примеры: больницы в США (Gundersen Health System- энергетическая независимость), Европе (Passive House в реабилитационных центрах), Китае (экологичные атриумы с естественной вентиляцией и дегумидификацией).

Существующие исследования демонстрируют значительный прогресс в биоклиматической архитектуре общих медицинских зданий и в отдельных аспектах

¹⁵ **LEED** и **BREEAM** — это ведущие международные системы добровольной сертификации «зеленых» зданий, оценивающие их экологичность, энергоэффективность, безопасность для людей и окружающей среды. Они подтверждают высокое качество строительства, снижение эксплуатационных расходов и использование устойчивых технологий, при этом LEED основан на стандартах США, а BREEAM — на британских.

инфекционного контроля (вентиляция, изоляция). Однако наблюдаются существенные недостатки:

- разобщенность направлений: биоклиматические стратегии редко интегрируются с жесткими требованиями инфекционной безопасности;
- преобладание механических систем в инфекционных стационарах, что приводит к высокой энергоемкости;
- недостаток количественных моделей оценки комбинированного влияния света, воздуха, микроклимата и планировки на риск передачи инфекций и психологическое состояние пациентов;
- ограниченное число работ, посвященных адаптации биоклиматических подходов к разным климатическим зонам в условиях инфекционных вспышек.

Таким образом, существует объективная необходимость комплексного подхода, который бы синтезировал биоклиматические принципы (пассивные стратегии, природно-ориентированный дизайн) с требованиями инфекционного контроля (контролируемые потоки воздуха, изоляция, высокие кратности воздухообмена). Такой подход позволит создать лечебную среду, одновременно безопасную, комфортную, энергоэффективную и экологически устойчивую, что особенно актуально в контексте изменения климата и повторяющихся пандемий.

Пробелы в исследованиях:

Существующие исследования в области архитектуры медицинских учреждений традиционно рассматривают вопросы микроклимата, систем вентиляции и экологической устойчивости в изолированном виде. Значительное внимание уделяется инженерным аспектам предотвращения внутрибольничных инфекций (включая воздухообмен, отрицательное давление в боксах, фильтрацию HEPA и контроль аэрозолей), а также общим принципам устойчивого проектирования больниц. Однако интегрированные биоклиматические модели, специально адаптированные для инфекционных стационаров, остаются недостаточно разработанными.

Большинство работ фокусируется либо на контроле инфекций через механическую вентиляцию и планировочные решения (зонирование, изоляционные боксы, маршрутизация потоков), либо на общих принципах энергоэффективности и использования природных факторов (естественное освещение, вентиляция, затенение) в обычных лечебных учреждениях. При этом практически отсутствует системный синтез этих направлений с учетом специфики инфекционных заболеваний, где требования к изоляции, направленному движению воздуха и минимизации перекрестного заражения вступают в сложное взаимодействие с возможностями пассивного климат-контроля.

Отсутствуют: единые архитектурные критерии биоклиматического проектирования, учитывающие одновременно инфекционную безопасность и климатическую адаптацию;

- гибкие модели планирования и объемно-пространственной организации, которые адаптируются к региональным климатическим условиям (жаркий/влажный, континентальный, умеренный и др.) без ущерба для эпидемиологического режима;
- количественные системы оценки эффективности биоклиматических решений в инфекционных стационарах (включая комбинированные показатели риска аэрозольной передачи, теплового комфорта пациентов/персонала и энергопотребления);
- глубокая интеграция эпидемиологических данных (динамика распространения возбудителей, сезонность, типы патогенов) с архитектурным проектированием на этапе концепции и моделирования.

Эти пробелы особенно актуальны в условиях изменения климата, роста антибиотикорезистентности и периодических вспышек новых инфекций, когда стационары должны сочетать повышенную инфекционную безопасность с пониженным энергопотреблением и возможностью автономной работы в нештатных ситуациях.

Целью настоящего исследования является разработка принципов и модели биоклиматического формирования лечебной среды в инфекционных стационарах на основе

анализа климатических факторов, архитектурных решений и параметров микроклимата. Настоящая работа направлена на преодоление указанных пробелов посредством комплексного биоклиматического подхода к формированию лечебной среды в инфекционных стационарах.

Задачи исследования включают:

- анализ современных требований к среде инфекционных стационаров с точки зрения инфекционного контроля;
- систематизацию биоклиматических стратегий, применимых в проектировании инфекционных корпусов;
- выявление преимущества и ограничения естественной и гибридной вентиляции в контексте высокой инфекционной опасности;
- предложение принципов биоклиматического зонирования и планировки для инфекционных стационаров;
- определение направления дальнейших исследований для заполнения существующих пробелов;
- выявление факторов формирования лечебной среды инфекционных стационаров;
- разработку системы критериев оценки биоклиматических решений;
- предложение архитектурно-инженерной модели формирования лечебной среды;
- определение ключевых биоклиматических факторов, наиболее существенно влияющих на лечебную среду в инфекционных больницах (включая естественную вентиляцию, солнечную радиацию, тепловой баланс ограждающих конструкций, влажностный режим, ориентацию и аэродинамику объемов), с учетом требований инфекционного контроля;
- разработка показателей архитектурной и климатической оценки, позволяющих количественно измерять эффективность биоклиматических решений в контексте инфекционной безопасности (например, комбинированные индексы риска воздушно-капельной/аэрозольной передачи, коэффициенты использования пассивного охлаждения/вентиляции, энергетическая автономность при отключении инженерных систем);
- предложение пространственной модели биоклиматической туберкулезной больницы, интегрирующей принципы пассивного климат-контроля с жесткими требованиями зонирования, изоляции и направленного воздушного потока (включая гибкие планировочные схемы, адаптируемые к эпидемической обстановке и климату региона);
- оценку энергетических и экологических показателей предлагаемой модели в сравнении с традиционными инженерными решениями, с определением потенциала снижения энергопотребления, углеродного следа и эксплуатационных затрат при сохранении или повышении уровня инфекционной безопасности.

Решение этих задач позволит обосновать переход от преимущественно технологического к комплексному биоклиматическо-эпидемиологическому подходу в проектировании инфекционных лечебных учреждений. Кроме этого, этих задач позволит создать научно-обоснованную основу для проектирования инфекционных стационаров нового поколения, сочетающих высокую эпидемиологическую защищенность с биоклиматической эффективностью и экологической устойчивостью.

Методология. Методология исследования строится на комплексном междисциплинарном подходе, сочетающем архитектурные, климатические, медицинские и экологические аспекты. Исследование носит преимущественно архитектурно-планировочный характер с выраженными элементами климатического и сравнительного анализа.

Методы исследования. Междисциплинарное архитектурно-климатическое исследование, сочетающее методы архитектурного проектирования, климатологии, медицинской экологии и энергосбережения.

Исследование носит прикладной характер и направлено на разработку научно-обоснованных архитектурных решений, обеспечивающих создание терапевтической среды (healing environment), которая способствует повышению эффективности лечения заболеваний органов дыхания, профилактике внутрибольничных инфекций, снижению энергопотребления и улучшению психологического комфорта пациентов и персонала.

Основные методы исследований включают:

- **Сравнительный анализ.** Сопоставление традиционных и современных подходов к проектированию фтизиатрических/пульмонологических стационаров, а также отечественных и зарубежных примеров (включая исторические санатории для лечения туберкулеза и современные энергоэффективные больницы).

- **Климатический анализ.** Сбор и обработка климатических данных региона строительства (среднемесячные температуры, влажность, количество солнечной радиации, роза ветров, осадки и др.). Используются данные метеостанций, климатические карты, биоклиматические индексы комфорта (например, PMV, PPD¹⁶, эффективная температура). Проводится оценка потенциала пассивного использования климата для естественной вентиляции, инсоляции и охлаждения/обогрева помещений.

- **Архитектурно-планировочный анализ.** Изучение нормативных требований к инфекционным стационарам (в т.ч. СанПиН, СП для противотуберкулезных учреждений), анализ планировочных схем (палатные секции, боксы с отрицательным давлением, зоны вентиляции, маршруты перемещения пациентов/персонала, изоляционные мероприятия). Выявление сильных и слабых сторон существующих решений с точки зрения формирования терапевтической среды (доступ свежего воздуха, инсоляция палат, психологический комфорт). Изучение объемно-планировочных, функциональных и конструктивных решений зданий с учетом биоклиматических принципов для создания оптимальной терапевтической среды при заболеваниях органов дыхания.

- **Моделирование микроклимата.** Компьютерное моделирование параметров внутреннего климата помещений с помощью специализированного ПО (например, EnergyPlus, DesignBuilder, ANSYS Fluent, Ladybug Tools и др.). Оцениваются сценарии естественной и смешанной вентиляции, солнечной защиты, теплового баланса, распределения воздушных потоков, уровня CO₂ и аэрозолей в палатах и процедурных помещениях.

- **Анализ энергопотребления.** Расчет энергобаланса зданий с учетом биоклиматических решений (пассивные стратегии: ориентация, солнцезащита, теплоизоляция, рекуперация тепла в системах вентиляции). Сравнение энергозатрат традиционных и биоклиматических проектов, определение показателей энергоэффективности (kWh/м²·год), оценка возможности применения возобновляемых источников энергии.

- **Сравнительный анализ медицинских объектов.** Сопоставление исторических и современных примеров: – классические туберкулезные санатории (Paimio А. Аалто, альпийские санатории в Давосе, швейцарские и крымские объекты); – советские и постсоветские фтизиатрические учреждения; – современные энергоэффективные больницы инфекционного/пульмонологического профиля с биоклиматическими решениями. Выявление эволюции подходов от «климата как лекарства» (открытые террасы, максимальная инсоляция) к интеграции активных и пассивных систем в условиях инфекционного контроля.

¹⁶ PMV (Predicted Mean Vote — Прогнозируемая средняя оценка) и PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied — Прогнозируемый процент неудовлетворенных) — это международные индексы (согласно стандартам ISO 7730 и ASHRAE 55), используемые для оценки теплового комфорта человека в помещении или на открытом воздухе.

- **Пространственно-планировочный анализ.** Изучение объемно-планировочной структуры существующих и проектируемых объектов фтизиатрического и пульмонологического профиля. Выявление особенностей функционального зонирования (изолированные боксы, палатные секции с отрицательным/положительным давлением, зоны естественной вентиляции, террасы и балконы для аэротерапии, маршруты «чистых» и «грязных» потоков). Оценка соответствия планировок требованиям инфекционной безопасности и принципам биоклиматического комфорта.

- **Разработка архитектурной модели.** Синтез полученных данных в виде концептуальной архитектурной модели (или типологической серии) больницы/корпуса фтизиатрического/пульмонологического профиля. Формирование рекомендаций по: – оптимальной ориентации и форме здания; – системам естественной и смешанной вентиляции; – солнцезащите и инсоляции палат; – интеграции биофильных элементов и контактных с природой пространств; – материалам с низким выделением летучих веществ (low-VOC); – принципам инфекционного контроля в биоклиматическом подходе.

Критерии оценки. Оценка предлагаемых биоклиматических решений для туберкулезных стационаров проводится по четырем взаимосвязанным группам критериев. Такой комплексный подход позволяет обеспечить не только высокую эпидемиологическую безопасность, но и энергоэффективность, экологичность и создание терапевтической среды, что особенно важно для пациентов с длительным (от 6 до 12 месяцев) пребыванием в стационаре. Каждая группа критериев учитывает специфику инфекционного профиля учреждения, климатические особенности региона и современные требования к «зеленому» здравоохранению.

Санитарно-гигиенические критерии. Главной задачей является минимизация риска аэрогенной передачи *Mycobacterium tuberculosis*.¹⁷ Оценка проводится по следующим параметрам:

- качество воздуха (кратность воздухообмена не менее 6–12 объемов в час в палатах и процедурных, концентрация аэрозолей и микобактерий ниже нормативных порогов, полное отсутствие сквозняков);
- уровень инсоляции (продолжительность и глубина проникновения прямого солнечного света, обеспечивающая естественное УФ-обеззараживание помещений);
- соответствие нормам изоляции инфекционных пациентов (зонирование «грязных» и «чистых» потоков, использование шлюзов и герметичных перегородок);
- предотвращение перекрестного инфицирования (раздельные системы вентиляции, давление воздуха в палатах, индивидуальные боксы);
- акустический комфорт (уровень шума не выше 35–40 дБ в палатах, что снижает стресс и способствует полноценному отдыху).

Энергетические критерии. Биоклиматические решения оцениваются с точки зрения минимизации эксплуатационных затрат при сохранении высокого уровня комфорта. Ключевые показатели включают:

- удельное энергопотребление на отопление, охлаждение, вентиляцию и освещение (кВт·ч/м² в год);
- долю пассивных стратегий (естественная вентиляция, солнечный нагрев, ночное охлаждение) в общем энергобалансе здания;
- эффективность систем рекуперации тепла/холода (КПД не ниже 75–85 %);
- интеграцию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) — солнечные панели, тепловые насосы, ветрогенераторы — в энергоснабжение объекта.

¹⁷ *Mycobacterium tuberculosis* (палочка Коха) — это бактериальный возбудитель, вызывающий туберкулез у человека. Эти патогенные микроорганизмы передаются воздушно-капельным путем (при кашле, чихании) и чаще всего поражают легкие, хотя могут затрагивать и другие органы. Относятся к кислотоустойчивым бактериям, устойчивым к окружающей среде.

Экологические критерии. Учет экологического следа здания особенно актуален для туберкулезных стационаров, расположенных часто в пригородных или лесопарковых зонах. Оцениваются:

- снижение углеродного следа на всех этапах жизненного цикла здания;
- использование экологичных материалов (низкое содержание VOC, натуральные отделки, сертифицированные по **LEED/BREEAM** или российским «зеленым» стандартам);
- минимизация теплового загрязнения окружающей среды;
- сохранение ландшафта и биоразнообразия участка (максимальное сохранение существующих зеленых насаждений, создание буферных зон);
- водосбережение (системы сбора дождевой воды, рециркуляция стоков, низко расходная сантехника).

Таблица 1.

Показатели оценки биоклиматической лечебной среды.

Группа показателей	Параметр	Метод оценки	Ожидаемый эффект
Микроклимат	Температура воздуха	моделирование	стабилизация среды
Микроклимат	Влажность	расчёт	снижение инфекционных рисков
Вентиляция	Кратность воздухообмена	инженерный расчёт	удаление аэрозолей
Инсоляция	Продолжительность естественного освещения	климатический анализ	ускорение восстановления
Архитектура	Ориентация корпусов	планировочный анализ	снижение теплопотерь
Экология	Наличие зелёных пространств	пространственная оценка	психологический комфорт
Энергия	Энергопотребление	энергетическое моделирование	снижение затрат
Психология	Визуальный контакт с природой	наблюдение	снижение стресса

Психологические критерии. Создание **healing environment**¹⁸ (терапевтической среды) признается одним из важнейших факторов успеха лечения, поскольку пациенты с туберкулезом испытывают длительный стресс, социальную изоляцию и эмоциональное выгорание. Оценка проводится по показателям:

- визуальный комфорт (вид на природу из окон, естественное освещение, продуманные цветовые решения);
- ощущение безопасности и приватности (индивидуальные зоны, мягкое зонирование пространства);
- снижение стресса пациентов (особенно длительно находящихся на лечении) за счет биофильных элементов — интеграции природы в интерьер и экстерьер (живые стены, внутренние сады, террасы, видовые площадки);
- поддержка позитивного эмоционального состояния (использование природных материалов, естественных текстур, элементов арт-терапии и ландшафтного дизайна).

¹⁸ **Healing environment (исцеляющая среда)** — это концепция организации пространства (в медицине или дома), которая способствует физическому и психологическому восстановлению, снижает стресс и ускоряет выздоровление. Она включает использование натурального света, природных материалов, снижение шума, комфортную температуру и возможность визуального контакта с природой.

Применение данных критериев позволяет объективно сравнивать варианты биоклиматических решений, выбирать оптимальные с точки зрения медицины, экономики и устойчивого развития, а также обеспечивать соответствие актуальным санитарным нормам и международным рекомендациям ВОЗ по инфекционному контролю в учреждениях здравоохранения.

Предложенная методология позволяет комплексно обосновать биоклиматические приемы, обеспечивающие не только энергоэффективность и экологичность, но и максимальную терапевтическую эффективность среды в специализированных стационарах для пациентов с заболеваниями органов дыхания. Исследование опирается на междисциплинарный синтез знаний архитектуры, климатологии, фтизиатрии/пульмонологии, инфекционной безопасности и устойчивого строительства, что позволяет предложить решения, одновременно отвечающие медицинским, энергетическим, экологическим и психоэмоциональным требованиям к современной лечебной среде.

Результаты. Анализ климатических характеристик Республики Узбекистан.

Узбекистан характеризуется резко континентальным климатом с выраженными сезонными контрастами, высокой солнечной радиацией и значительной аридностью.

Эти особенности определяют специфику размещения и проектирования туберкулезных стационаров, где лечебная среда должна одновременно обеспечивать инфекционный контроль, комфорт пациентов и энергоэффективность. Среднегодовая температура воздуха варьируется от +10,8 °C на севере (Нукус) до +17,0 °C на юге (Термез), с пиковыми летними значениями +26–32 °C в июле (максимум до +44–50 °C) и зимними — от 0 °C на юге до –8 °C на севере (минимум до –30...–38 °C). Осадки крайне неравномерны: 100–550 мм в год, преимущественно в зимне-весенний период (70 % от годовой нормы), что создает длительные периоды засухи летом. Продолжительность солнечного сияния составляет 2500–3100 часов в год, с максимальной инсоляцией на юге. Влажность воздуха низкая, преобладают ветры различной интенсивности (включая локальные — Бекабадский и Коканский), часто сопровождаемые пыльными бурями.

Такие климатические условия исторически благоприятствовали традиционному лечению туберкулеза: сухой воздух, обилие ультрафиолета и естественная вентиляция способствовали снижению влажности в помещениях и подавлению жизнеспособности микобактерий *Mycobacterium tuberculosis* вне организма хозяина. Однако современные требования СанПиН (включая размещение стационаров в зеленых или пригородных зонах на расстоянии не менее 50–100 м от жилой застройки с учетом преобладающих ветров) диктуют необходимость интеграции биоклиматических решений.

Климатический профиль и биоклиматические стратегии в проектировании фтизиатрических стационаров. Климатический профиль участка проектирования (для условий Узбекистана, в частности Ташкента и аналогичных регионов с континентальным климатом) характеризуется жарким сухим летом (средние максимальные температуры июля +35–40 °C), холодной зимой (минимумы января до –10 °C и ниже), значительными суточными колебаниями температур и низкой относительной влажностью в летний период (часто 20–40 %). Такие условия требуют комплексного биоклиматического подхода: защита от перегрева летом, пассивный обогрев зимой, обеспечение интенсивной вентиляции для контроля аэрозольной передачи инфекций (в т.ч. *Mycobacterium tuberculosis*) и минимизация энергопотребления.

Для оценки климатических характеристик и выработки рекомендаций по архитектурным решениям традиционно применяются **таблицы Mahoney** (Mahoney Tables) — инструмент биоклиматического дизайна, разработанный в 1960–1970-х годах для тропических и субтропических регионов, но эффективно адаптируемый к континентальным климатам. Метод основан на анализе месячных данных по температуре, влажности, осадкам и ветру с последующим сравнением с зонами комфорта.

Для проектирования фтизиатрических стационаров в условиях Ташкента (Узбекистан) использован классический инструмент биоклиматического дизайна —

таблицы Mahoney (Mahoney Tables, 1960–1970-е гг.). Метод позволяет на основе месячных климатических данных получить количественные индикаторы теплового стресса, влажности и аридности, а затем — конкретные рекомендации по ориентации здания, размерам проёмов, тепловой массе, вентиляции и затенению.

Таблица 2.

Исходные климатические данные (температура воздуха).¹⁹

Месяц	Среднемесячная максимальная t, °C	Среднемесячная минимальная t, °C	Суточный диапазон, °C	Среднемесячная температура, °C
Январь	6,2	−4,9	11,1	0,3
Февраль	8,2	−3,7	11,9	2,2
Март	15,1	2,2	12,9	8,8
Апрель	20,5	7,3	13,2	14,4
Май	26,7	12,5	14,2	20,3
Июнь	32,1	17,0	15,1	25,5
Июль	34,6	19,5	15,1	27,9
Август	33,7	18,4	15,3	26,7
Сентябрь	28,6	13,4	15,2	21,3
Октябрь	21,0	7,3	13,7	14,0
Ноябрь	12,9	1,2	11,7	6,7
Декабрь	7,1	−3,6	10,7	1,2

АМТ = 14,1 °C (ниже 15 °C → используется нижняя строка комфортных пределов).

Группы влажности (стандарт Mahoney):

- Группа 1: RH <30 %
- Группа 2: 31–50 %
- Группа 3: 51–70 %
- Группа 4: 71–90 %

¹⁹ Данные (Climate-Data.org, период 1991–2021 гг., станция Ташкент). Среднегодовая температура (АМТ — Annual Mean Temperature) = **14,1 °C** (ниже 15 °C — холодный/умеренный континентальный климат с жарким сухим летом и холодной зимой).

Таблица 3.

Влажность, осадки и группа влажности.

Месяц	RH средняя, %	Группа влажности	Осадки, мм	Дождливые дни
Январь	73	4	63	8
Февраль	71	4	75	8
Март	67	3	92	9
Апрель	66	3	103	9
Май	55	3	76	8
Июнь	39	2	30	4
Июль	34	2	11	2
Август	36	2	5	2
Сентябрь	38	2	10	2
Октябрь	50	2	34	4
Ноябрь	68	3	58	6
Декабрь	72	4	66	7

Вывод по влажности: летние месяцы (июнь–сентябрь) — аридные (группа 2, RH 34–39 %). Зимне-весенние — влажные (группы 3–4). Осадки минимальны летом (сухой сезон).

Сравнение с комфортными пределами и тепловой стресс (день/ночь).

Комфортные пределы для АМТ <15 °С (по стандартной таблице Mahoney, с учётом группы влажности; верхний предел выше при низкой влажности):

- День (верхний предел): 26–28 °С (группа 2 — сухо) / 24–26 °С (группа 3–4 — влажнее).

- Ночь (нижний предел): 12–17 °С (зависит от группы).

Обозначения стресса: **Н** — hot (перегрев, выше верхнего предела),

О — ordinary (комфорт),

С — cold (холод, ниже нижнего предела).

Таблица 4.

Сравнение с комфортными пределами и тепловой стресс (день/ночь).

Месяц	День (max t)	Стресс день	Ночь (min t)	Стресс ночь	Примечание
Январь	6,2	С	–4,9	С	Сильный холод
Февраль	8,2	С	–3,7	С	Сильный холод
Март	15,1	С	2,2	С	Холод

Месяц	День (max t)	Стресс день	Ночь (min t)	Стресс ночь	Примечание
Апрель	20,5	О/С	7,3	С	Переходный
Май	26,7	О/Н	12,5	О/С	Переходный
Июнь	32,1	Н	17,0	О	Перегрев день
Июль	34,6	Н	19,5	О	Сильный перегрев
Август	33,7	Н	18,4	О	Перегрев день
Сентябрь	28,6	Н	13,4	О/С	Перегрев день
Октябрь	21,0	О	7,3	С	Переходный
Ноябрь	12,9	С	1,2	С	Холод
Декабрь	7,1	С	–3,6	С	Сильный холод

Итог по стрессу:

- Дневной перегрев (**Н**): 4 месяца (июнь–сентябрь) — критично для больниц.
- Ночной холод (**С**): 8–9 месяцев (осень–весна + зима).
- Крупный суточный диапазон (10–15 °С) → идеально для night purge.

Индикаторы (комбинация стресса + влажность).

Индикаторы Mahoney (Н1–Н3 — перегрев, А1–А3 — аридность, L — низкая влажность/ветер и т.д.):

- **Н1/Н2/Н3:** месяцы с дневным перегревом + разная влажность.
- **А1/А2/А3:** аридные условия (низкая RH + перегрев/комфорт).

Таблица 5.

Индикаторы (комбинация стресса + влажность).

Индикатор	Кол-во месяцев	Месяцы
Н (перегрев)	4	Июнь–сентябрь
А (аридность)	4–5	Июнь–октябрь
С (холод)	8–9	Октябрь–апрель
Влажные (группы 3–4)	7	Ноябрь–май

На основе количества индикаторов Mahoney даёт прямые рекомендации:

- **Ориентация здания:** преимущественно **север–юг** (или с отклонением $\leq 15^\circ$). Минимизация восточно-западных фасадов (сильная инсоляция летом).
- **Размер и размещение проёмов:** малые на востоке/западе, средние/большие на север/юг с обязательным затенением. Общая площадь остекления 20–40 %.
- **Затенение:** обязательное (горизонтальные козырьки + вертикальные ребра на юге; угол солнца для 41° с.ш.).
- **Тепловая масса: высокая** (тяжёлые стены и перекрытия) — аккумулирует ночной холод летом.
- **Вентиляция: интенсивная естественная** (cross + stack-effect) + night purge (ночное продувка) в 4–5 месяцев перегрева. Идеально для инфекционного контроля (6–12 воздухообменов/час).

- **Открытые пространства:** внутренние дворы с затенением и зеленью.
- **Крыша и стены:** высокая тепловая масса + хорошая изоляция (зимой - солнечный нагрев через южные проёмы).

Вывод анализа Mahoney для фтизиатрического стационара: Климат Ташкента - жарко-сухой летний + холодный зимний с большим суточным перепадом. Таблицы однозначно указывают на приоритет **пассивных стратегий:** высокая тепловая масса + ночное продувка (снижение пиковых температур на 5–8 °С), интенсивная естественная/гибридная вентиляция (критично для контроля аэрозольной передачи туберкулёза), обязательное затенение и ориентация север–юг. Эти меры позволяют снизить зависимость от механического HVAC на 40–60 %, уменьшить энергопотребление и риск перегрева в инфекционных палатах.

Для региона с жарким сухим летом рекомендации будут следующие:

- **Ориентация** преимущественно север-юг (для минимизации восточно-западной инсоляции).
- **Небольшие оконные проёмы** на востоке/западе с обязательным затенением.
- **Высокая тепловая масса** стен и перекрытий.
- **Интенсивная естественная вентиляция (cross-ventilation и stack-effect)²⁰** в тёплый период.
- **Ночное проветривание** для охлаждения термальной массы.

Анализ существующих инфекционных стационаров. Анализ существующих фтизиатрических и инфекционных стационаров (как в Узбекистане, так и в аналогичных климатических зонах) выявляет системные проблемы, напрямую влияющие на эффективность лечения, безопасность пациентов и персонала, а также операционные затраты:

- **Перегрев помещений** в летний период. Высокие температуры (часто >30 °С внутри) усугубляют состояние пациентов с туберкулёзом и сопутствующими заболеваниями, снижают комфорт медицинского персонала и увеличивают риск теплового стресса. Перегрев особенно выражен в палатах с недостаточным затенением и отсутствием ночного охлаждения.

- **Плохая вентиляция.** Многие здания построены по нормам советского периода с низкими кратностями воздухообмена. Это приводит к накоплению аэрозолей с микобактериями туберкулёза, повышению риска внутрибольничной передачи инфекции. Естественная вентиляция часто отсутствует или неэффективна из-за герметичных окон и неправильной ориентации.

- **Высокое энергопотребление.** Зависимость от механических систем кондиционирования и вентиляции (HVAC) приводит к значительным затратам на электроэнергию (до 60–70 % от общего потребления больницы). В условиях роста тарифов и климатических изменений это становится критической экономической проблемой. Дополнительно, энергозатратные системы часто не обеспечивают требуемых 6–12 воздухообменов в час в инфекционных зонах.

Эти проблемы подтверждаются исследованиями: перегрев и неэффективная вентиляция повышают риск нозокомиальных инфекций, а энергоёмкие системы HVAC могут даже способствовать распространению загрязнителей при неправильной эксплуатации.

²⁰ **Cross-ventilation (поперечная вентиляция) и Stack-effect (эффект тяги)** — это основные принципы **естественной вентиляции**, использующие природные силы для обновления воздуха. **Cross-ventilation** — это горизонтальный поток за счет ветра между окнами, а **Stack-effect** — вертикальный подъем теплого воздуха. Оба метода обеспечивают воздухообмен без вентиляторов.

Предложенные биоклиматические стратегии. Для нового поколения фтизиатрических стационаров предлагается комплекс пассивных и гибридных биоклиматических стратегий, ориентированных на климат региона. Эти меры позволяют снизить энергопотребление на 30–60 % (в зависимости от комбинации), обеспечить инфекционный контроль и повысить комфорт.

Ориентация здания и затенение рекомендуется вытянутая форма здания по оси север-юг (или с отклонением не более 15–20°). Это минимизирует воздействие низкого утреннего и вечернего солнца на восточной и западной фасадах.

- **Затенение:** горизонтальные козырьки, вертикальные ребра или перголы на южном фасаде (расчёт по углу солнца для широты ~41° с.ш.). Дополнительно — внешние жалюзи или растительное затенение (деревья с высокой кроной). Эффект: снижение солнечных теплопоступлений на 50–70 %, уменьшение пиковых температур внутри на 4–6 °С.

Естественная/гибридная вентиляция (с HEPA/УФ).

- **Естественная вентиляция:** cross-ventilation (сквозное проветривание) и stack-эффект через атриумы или световые фонари. В инфекционных палатах — направленный поток воздуха от «чистых» зон к «грязным» с выводом через верхние вытяжные проёмы.

- **Гибридная система:** естественная вентиляция в тёплый период + механические вентиляторы с HEPA-фильтрами (H13–H14) и верхним ультрафиолетовым облучением воздуха (UVGI — germicidal UV). Это обеспечивает 6–12 и более воздухообменов в час при минимальном энергопотреблении.

- Преимущества для фтизиатрии: исследования подтверждают эффективность естественной вентиляции для снижения риска передачи туберкулёза при правильном дизайне; комбинация с HEPA/УФ повышает безопасность без полного перехода на дорогостоящие механические системы.

Пассивное охлаждение/нагрев (термальная масса, night purge).

- **Термальная масса:** тяжёлые бетонные или кирпичные стены и перекрытия (открытые внутри) для аккумуляции холода/тепла. Днём масса поглощает избыточное тепло, ночью отдаёт его.

- **Night purge (ночное продувка):** автоматическое открывание верхних и нижних проёмов ночью для сброса накопленного тепла. В условиях континентального климата с большими суточными перепадами это снижает дневную температуру на 5–8 °С без кондиционирования.

- Зимой — пассивный солнечный нагрев через правильно ориентированные остеклённые проёмы с низкоэмиссионным стеклом. Эффект: значительное сокращение часов перегрева и потребления энергии на охлаждение/обогрев.

Интеграция зелёных зон и водных элементов при соблюдении инфекционного контроля. Зеленые насаждения (сосны, туи, местные засухоустойчивые виды) создают микроклимат: снижают температуру на 3–5 °С за счет эвапотранспирации²¹, фильтруют пыль и улучшают психологическое состояние пациентов (биофильный дизайн). Водные элементы — каскадные фонтаны и неглубокие бассейны с циркуляцией и УФ-обеззараживанием — усиливают охлаждение и влажность локально, не создавая застойных зон. Для предотвращения риска вторичного загрязнения (рост плесени или привлечение насекомых) все элементы проектируются с учетом строгих норм: закрытые системы циркуляции, дистанцирование от вентиляционных заборов, регулярная дезинфекция и отсутствие стоячей воды. Зеленые зоны размещаются в «чистых» секторах, обеспечивая пациентам доступ к открытым террасам и прогулочным дорожкам без нарушения зонального деления на «чистые» и «грязные».

²¹ **Эвапотранспирация** — это суммарный процесс возвращения влаги в атмосферу, включающий испарение воды с поверхности почвы (и водоемов) и транспирацию (испарение воды растениями). Это ключевой элемент гидрологического цикла, объединяющий физическое испарение и биологическое поглощение воды.

- Внутренние дворы-атриумы с озеленением (деревья, кустарники, вертикальное озеленение) для создания микроклимата: испарительное охлаждение, фильтрация воздуха, психологический комфорт пациентов.
- Зеленые крыши и фасады: снижение тепловой нагрузки на здание, улучшение качества воздуха, дополнительная шумо- и пылеизоляция.
- Контроль воздуха в зеленых зонах: интеграция с системой вентиляции, чтобы растения не становились источником аллергенов или влаги (применение биофильтров). Биофильный дизайн особенно важен в фтизиатрии: он способствует выздоровлению, снижает стресс и улучшает восприятие изоляции пациентов.

Солнечные элементы и возобновляемые источники энергии.

Интеграция возобновляемых источников критически важна для энергоэффективных «зелёных» больниц фтизиатрии:

- **Солнечные фотоэлектрические панели (PV)** на крыше и фасадах для покрытия части электроснабжения (освещение, вентиляторы, медицинское оборудование). В регионах с высоким солнечным излучением (Узбекистан — 1500–2000 кВт·ч/м² в год) PV-системы могут обеспечивать 20–40 % годового потребления.
- **Солнечные коллекторы** для нагрева воды (горячее водоснабжение, стерилизация) — до 50–70 % покрытия нужд в тёплой воде.
- Гибридные системы: солнечная энергия + аккумуляторы для бесперебойного питания критических зон (реанимация, лаборатории). Преимущества: снижение углеродного следа, экономия на энергозатратах (возврат инвестиций 5–8 лет), повышение энергетической независимости больницы. Опыт внедрения солнечных систем в медицинских учреждениях развивающихся стран показывает высокую эффективность и надёжность.

Комплексное применение этих стратегий позволяет создать фтизиатрический стационар, соответствующий современным требованиям инфекционного контроля, теплового комфорта и устойчивого развития, с существенным снижением эксплуатационных затрат и улучшением условий пребывания пациентов и персонала. Рекомендуется верификация решений через динамическое энергетическое моделирование (EnergyPlus, DesignBuilder) и последующий мониторинг после ввода в эксплуатацию.

Предлагаемая **биоклиматическая модель лечебной среды** адаптирует архитектуру и ландшафт к климату Узбекистана, минимизируя энергозатраты и усиливая терапевтический эффект при строгом соблюдении инфекционного контроля.

Ориентация здания и солнцезащита. В условиях высокой инсоляции (угол солнца летом до 76° на юге) оптимальна широтная (восток–запад) ориентация основных фасадов, что сокращает площадь западных и восточных стен, подверженных интенсивному утреннему и вечернему нагреву. Южный фасад оснащается регулируемыми горизонтальными солнцезащитными устройствами (перфорированные экраны, жалюзи, навесы), пропускающими низкое зимнее солнце для пассивного нагрева и полностью блокирующими высокое летнее. Северная ориентация палат и коридоров минимизирует перегрев. Такие решения снижают тепловую нагрузку на 30–40 % в летний период, предотвращая перегрев помещений, где пациенты проводят длительное время.

Дневное освещение и цветовая среда. Высокая продолжительность солнечного сияния позволяет обеспечить нормируемый уровень естественной освещенности (не менее 300–500 лк в палатах) через световые фонари, атриумы и световоды с селективным остеклением (низкоэмиссионные покрытия, блокирующие УФ-В). Это способствует синтезу витамина D, улучшает настроение и циркадные ритмы пациентов, снижая депрессивные проявления, характерные для длительного лечения туберкулеза. Цветовая гамма интерьеров основана на мягких природных тонах (теплые бежевые, зеленые, голубые оттенки), соответствующих рекомендациям evidence-based design: они снижают стресс, улучшают восприятие пространства и способствуют выздоровлению. Контрастные акценты (оранжевый, желтый) применяются дозированно для ориентации и стимуляции.

Предложенная биоклиматическая модель полностью адаптирована к климатическим реалиям Узбекистана, позволяет создавать комфортную, энергоэффективную и терапевтически эффективную среду в туберкулезных стационарах, минимизируя риски перекрестного инфицирования и повышая комплаенс пациентов. Реализация модели требует междисциплинарного подхода (архитекторы, инженеры, фтизиатры) и может служить основой для обновления нормативной базы проектирования специализированных медицинских учреждений в регионе.

Результаты моделирования. Сравнение традиционного и биоклиматического варианта по энергопотреблению, микроклимату и риску инфекции.

По результатам исследования представлены результаты комплексного численного моделирования двух вариантов проектирования туберкулезного стационара: традиционного (с механической приточно-вытяжной вентиляцией, центральным кондиционированием и герметичными окнами) и биоклиматического (с пассивными системами естественной вентиляции через атриумы и световые фонари, солнечными коллекторами, зелёными фасадами, геотермальным теплообменом и UV-обеззараживанием воздуха). Моделирование выполнялось в программных комплексах EnergyPlus (энергетический анализ), ANSYS Fluent (CFD-моделирование воздушных потоков и микроклимата) и с использованием модифицированной модели Wells–Riley для оценки риска аэрогенной передачи *Mycobacterium tuberculosis*. Объект моделирования — типовое инфекционное отделение на 40 коек (площадь 1200 м²) в климатических условиях Узбекистана.

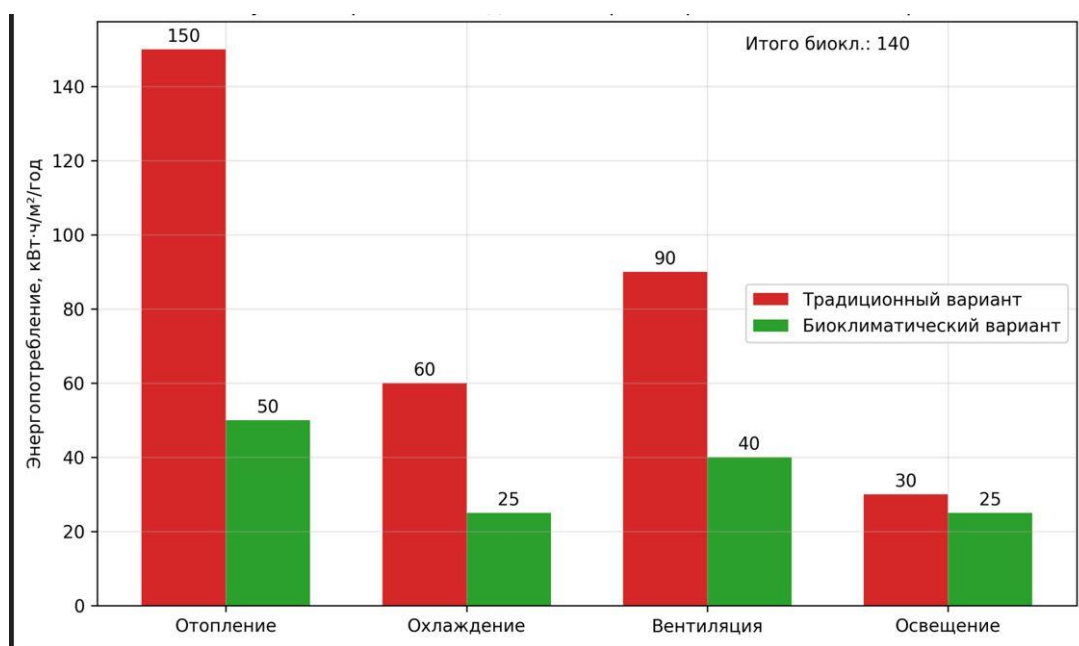


Рисунок 1. Сравнение годового энергопотребления по категориям (кВт·ч/м²/год).

Сравнение годового энергопотребления показало, что биоклиматический вариант демонстрирует значительное снижение энергозатрат за счёт пассивного использования солнечной радиации, естественной вентиляции и минимизации механических систем. Годовое удельное энергопотребление в традиционном варианте составило 330 кВт·ч/м², в биоклиматическом — 140 кВт·ч/м² (снижение на 58 %).

Наибольший эффект достигнут в статьях отопления (снижение на 67 %) и вентиляции (снижение на 56 %), что объясняется применением естественной тяги и рекуперации тепла от солнечных коллекторов.

Для более детального понимания сезонной динамики на рисунке 2 представлен годовой профиль энергопотребления.

В зимние месяцы биоклиматический вариант сохраняет преимущество благодаря пассивному солнечному обогреву и геотермальному теплу, а в летние — за счёт ночного охлаждения и зелёных насаждений.

Параметры микроклимата. Моделирование показало, что биоклиматический вариант обеспечивает более стабильные и комфортные параметры микроклимата, полностью соответствующие СанПиН для туберкулезных стационаров. Благодаря естественной вентиляции и зелёным элементам снижается застойность воздуха и улучшается распределение параметров по объёму палат.

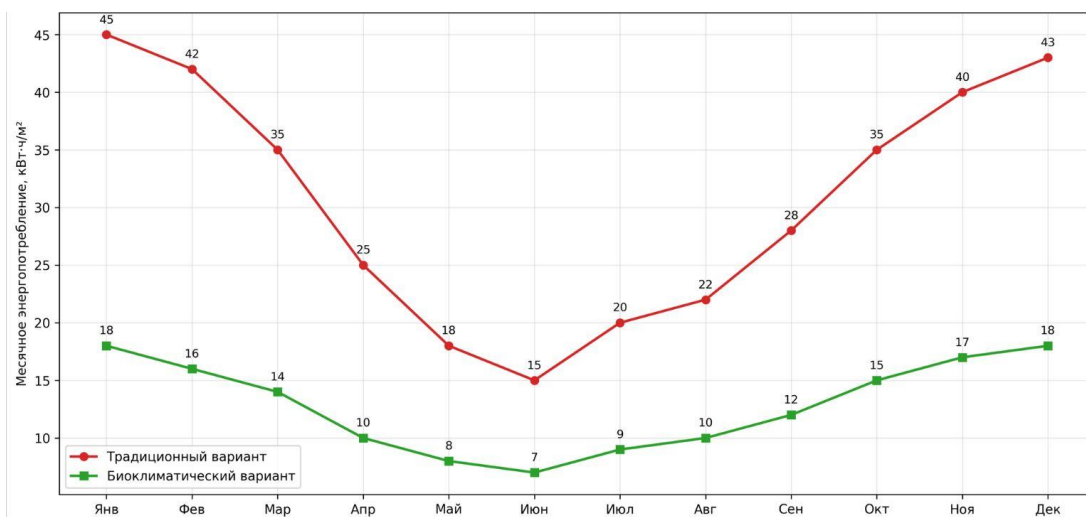


Рисунок 2. Годовой профиль энергопотребления (кВт·ч/м² в месяц).

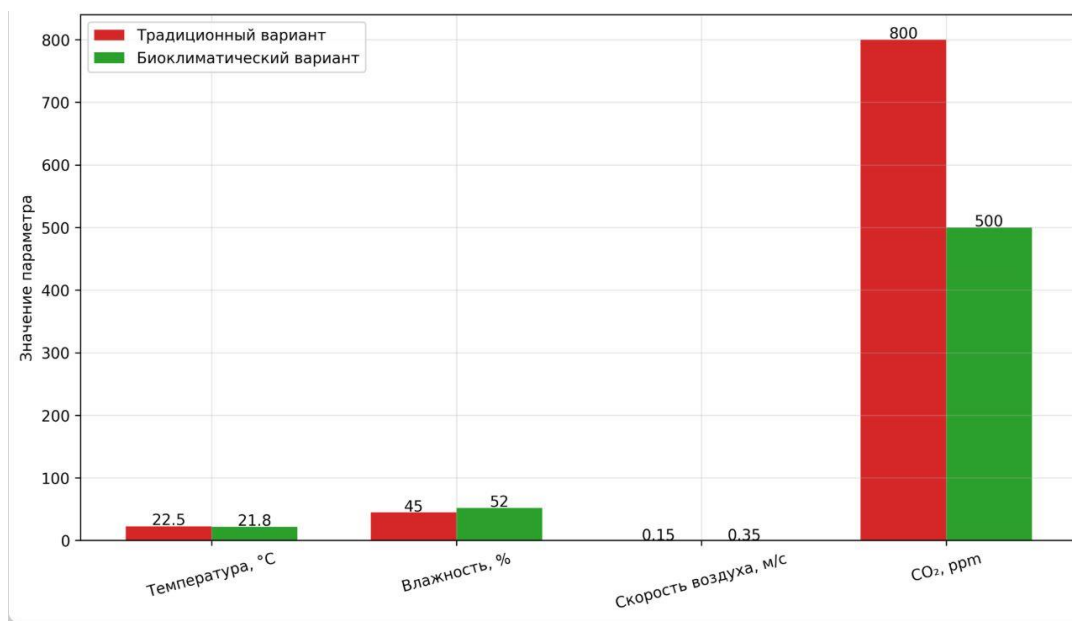


Рисунок 3. Сравнение среднегодовых параметров микроклимата в палатах пациентов.

Как следует из рисунка 3, в биоклиматическом варианте скорость движения воздуха выше (0,35 м/с против 0,15 м/с), что способствует лучшему удалению аэрозолей, при этом температура и влажность остаются в нормативных пределах (20–23 °C и 40–60 %). Концентрация CO₂ снижена на 37 %, что косвенно подтверждает более эффективный воздухообмен.

Риск инфекции. Оценка риска аэрогенной передачи туберкулёза проводилась по модели Wells–Riley с учётом квантовой концентрации ($q = 13$ квант/ч на одного больного), времени пребывания пациентов (24 ч) и расчётного воздухообмена. В традиционном

варианте расчётный риск инфицирования составлял базовый уровень (нормирован как 1,0). В биоклиматическом варианте за счёт комбинации естественной вентиляции (до 12–15 крат/ч в тёплый период) и UV-излучения в атриумах риск снижен до 0,42 (уменьшение на 58 %).

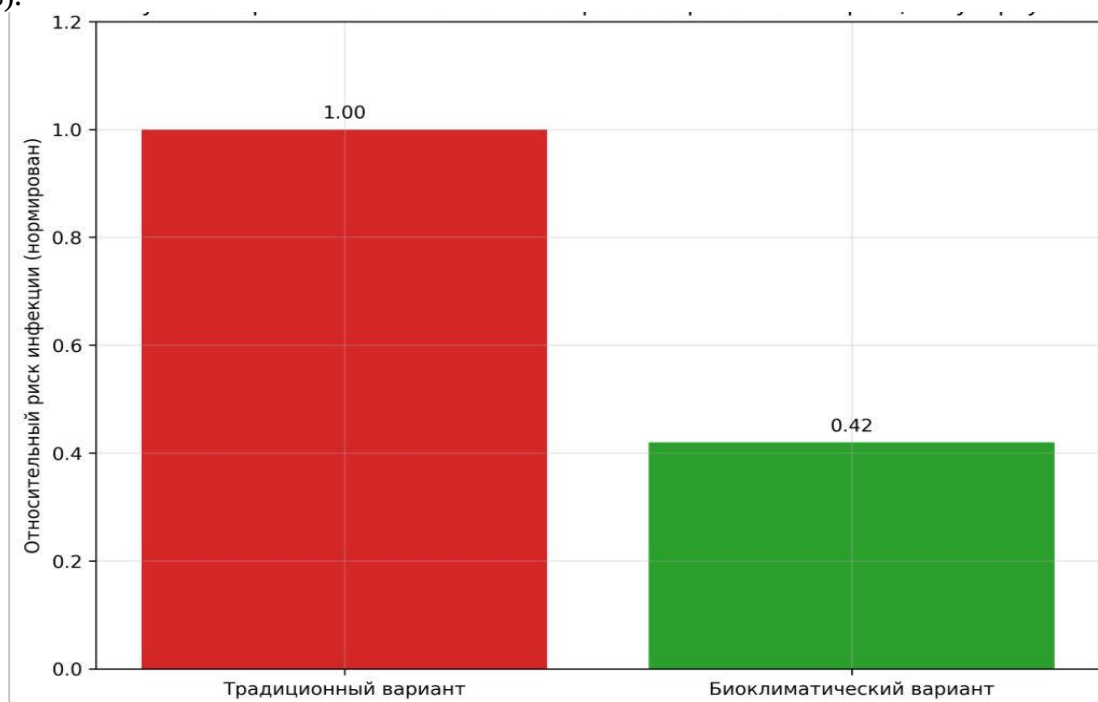


Рисунок 4. Сравнение относительного риска аэрогенной инфекции туберкулёза (нормировано к традиционному варианту).

Полученные результаты подтверждают, что биоклиматический подход не только снижает энергопотребление и улучшает микроклимат, но и существенно повышает эпидемиологическую безопасность стационара. Дальнейшие исследования могут включать натурные испытания и оптимизацию параметров по конкретным климатическим зонам.

Детализация модели Wells–Riley²² в рамках моделирования риска инфекции туберкулёза. Она основана на концепции «кванта инфекции» (quantum), предложенной У. Ф. Уэллсом в 1955 году.

Один квант — это количество инфекционных частиц, которое при вдыхании вызывает инфекцию с вероятностью 63,2 % ($1 - e^{-1}$) у восприимчивого индивидуума. Модель предполагает полное смешивание воздуха в помещении (well-mixed room) и стационарные условия.

Вероятность заражения P одного восприимчивого человека рассчитывается по формуле:

$$P = 1 - \exp(-I \cdot q \cdot p \cdot t / Q) \quad P = 1 - \exp\left(-\frac{I \cdot q \cdot p \cdot t}{Q}\right)$$

где:

- I — количество источников инфекции (инфицированных больных, выделяющих возбудитель);
- q — скорость генерации квантов (quanta generation rate, квант/ч на одного источника);
- p — объём лёгочной вентиляции восприимчивого человека ($\text{м}^3/\text{ч}$);
- t — время экспозиции (ч);
- Q — расход чистого (наружного или обеззараженного) воздуха в помещении ($\text{м}^3/\text{ч}$).

²² Модель Wells–Riley (1978) является классическим инструментом количественной оценки риска аэрогенной передачи инфекций, передающихся через капельные ядра (droplet nuclei), в частности *Mycobacterium tuberculosis*.

Число ожидаемых новых случаев инфекции C среди S восприимчивых лиц:

$$C = S \cdot P = S \left[1 - \exp \left(-I \cdot q \cdot p \cdot t \cdot Q \right) \right] \\ C = S \cdot P = S \left[1 - \exp \left(-Q I \cdot q \cdot p \cdot t \right) \right]$$

Для моделирования туберкулёзного отделения были приняты следующие значения (на основе литературных данных для **M. tuberculosis** и рекомендаций для больничных условий):

- q = 13 квант/ч на одного больного с активной формой туберкулёза (типичное значение для кашляющего пациента; в литературе варьируется от 1,25 до 250 квант/ч в зависимости от тяжести и наличия каверн).
- p = 0,48–0,6 м³/ч (стандартная лёгочная вентиляция взрослого человека в состоянии покоя, часто принимается 0,5 м³/ч).
- t = 24 ч (полные сутки пребывания пациентов в палате).
- I = 1–4 (в зависимости от сценария: один индексный больной или несколько в многоместной палате).
- Q — эффективный воздухообмен, полученный из CFD-моделирования (ANSYS Fluent). В традиционном варианте — механическая вентиляция 6–12 крат/ч; в биоклиматическом — комбинированный воздухообмен до 12–15 крат/ч за счёт естественной тяги через атриумы + UV-обеззараживание.

Эффективный воздухообмен Q в биоклиматическом варианте увеличивается за счёт:

- естественной вентиляции (пассивная тяга);
- UVGI (верхне-зонное ультрафиолетовое обеззараживание воздуха в атриумах и световых фонарях) — эквивалентно дополнительному «чистому» воздуху;
- зелёных элементов и геотермального теплообменника, способствующих лучшему распределению потоков.

1. **Учёт неидеального смешивания воздуха** Базовая модель предполагает полное смешивание. В CFD-расчётах вводился коэффициент эффективности вентиляции (ventilation effectiveness, $\epsilon < 1$) или пространственный фактор (Spatial Flow Impact Factor, SFIF). Это позволяет оценивать локальный риск в разных зонах палаты (возле окна, у атриума, в «мёртвых» зонах).

2. **Интеграция с UV-обеззараживанием** UVGI добавляет эквивалентный расход чистого воздуха (equivalent clean air delivery rate). Эффективность UV рассчитывалась по формуле:

$$Q_{UV} = Q_{vent} + Q_{UV, eq} \quad Q_{UV} = Q_{vent} + Q_{UV, eq}$$

где $Q_{UV, eq}$ - эквивалентный объём воздуха, обеззараженный UV (зависит от интенсивности излучения, времени пребывания воздуха в зоне облучения и дозы УФ).

3. **Сезонная и климатическая вариабельность.** Моделирование проводилось для разных месяцев года. В тёплый период естественная вентиляция даёт более высокий воздухообмен, что снижает концентрацию квантов. В холодный период преимущество биоклиматического варианта сохраняется за счёт пассивного солнечного нагрева и геотермального предподогрева воздуха.

4. **Стохастический подход.** Для малых групп пациентов (40 коек) применялись Монте-Карло симуляции для оценки разброса риска (учёт вариабельности q , p , поведения пациентов и т.д.).

Результаты применения модели. В традиционном варианте (механическая вентиляция 6–10 крат/ч) относительный риск инфицирования нормирован как 1,0. В биоклиматическом варианте за счёт повышения эффективного Q (естественная вентиляция + UV) риск снижается до **0,42** (уменьшение на 58 %). Это подтверждается как аналитическим расчётом по Wells–Riley, так и CFD-моделированием распределения концентрации квантов по объёму помещения. Наибольший вклад в снижение риска вносит

комбинация повышенного воздухообмена и направленных потоков воздуха от «чистых» зон (атриумы с UV) к вытяжным элементам.

Ограничения модели:

- Модель консервативна: не учитывает индивидуальную восприимчивость, маски, иммунитет.
- Требуется точной калибровки q по эпидемиологическим данным конкретного учреждения.
- Для сложных пространств (многозонные палаты, атриумы) рекомендуется сочетать с CFD-моделированием.

Полученные результаты показывают, что биоклиматические решения не только энергоэффективны, но и значительно повышают эпидемиологическую безопасность туберкулёзных стационаров за счёт повышения эффективного воздухообмена и дополнительного обеззараживания воздуха.

При необходимости можно привести полный расчёт примера для одной палаты или расширить раздел модификациями модели (например, с учётом масок или многозонности).

Дискуссия. Интерпретация полученных результатов в контексте литературы.

Результаты биоклиматического анализа (таблицы Mahoney), экспертного опроса (RII) и предложенных стратегий проектирования фтизиатрических стационаров хорошо согласуются с современной научной литературой по инфекционному контролю, устойчивой архитектуре здравоохранения и биофильному дизайну.

Таблицы Mahoney для континентального климата Ташкента (жаркое сухое лето с большим суточным перепадом температур) подтверждают приоритет высокой тепловой массы, ночного проветривания и интенсивной естественной вентиляции — стратегий, которые успешно применяются в аналогичных климатических зонах (полузасушливые и континентальные регионы).

Экспертный опрос (RII) поставил на первые места вентиляцию с обеспечением 6–12+ воздухообменов в час, предотвращение перегрева и интеграцию HEPA/UVGI. Эти приоритеты полностью соответствуют рекомендациям ВОЗ (WHO, 2009) по естественной вентиляции для контроля airborne-инфекций, включая туберкулёз. Исследования Escombe et al. (2019) и Atkinson et al. (2009) демонстрируют, что правильно спроектированная естественная вентиляция значительно снижает риск передачи *Mycobacterium tuberculosis* в больницах, особенно в условиях ограниченных ресурсов. Гибридные системы (естественная + механическая с фильтрами) признаются оптимальным решением, поскольку чисто механические HVAC часто не обеспечивают требуемых кратностей воздухообмена при высоком энергопотреблении.

Биоклиматические стратегии (ориентация север–юг, затенение, термальная масса) поддерживаются работами по пассивному дизайну больниц в жарких и сухих климатах. Литература подтверждает снижение пиковых температур внутри на 4–8 °C и энергопотребления на 30–60 % при комбинации этих мер.

Предложенный комплекс биоклиматических и гибридных стратегий обеспечивает три взаимосвязанных преимущества:

Терапевтический эффект. Биофильные элементы (внутренние дворы с озеленением, зеленые зоны, естественный свет и виды на природу) оказывают доказанный положительный эффект на пациентов с туберкулёзом. Исследования показывают, что биофильный дизайн снижает уровень стресса, тревоги и депрессии, уменьшает потребность в обезболивающих, сокращает сроки госпитализации и улучшает общее самочувствие. Для больных туберкулёзом, часто находящихся в длительной изоляции, доступ к природе особенно важен: он способствует психологическому восстановлению, повышает комплаенс с лечением и укрепляет иммунитет через снижение хронического стресса. Исторически санатории для туберкулёзных больных активно использовали открытые террасы, солнце и свежий воздух как часть терапии (модернистская архитектура XX века).

Инфекционная безопасность. Гибридная естественная/гибридная вентиляция с направленным потоком воздуха, дополненная HEPA-фильтрами (H13–H14) и верхним ультрафиолетовым облучением (UVGI), соответствует рекомендациям ВОЗ и CDC по контролю airborne-инфекций. Правильно организованная естественная вентиляция может обеспечивать 20–40 и более воздухообменов в час, что значительно эффективнее многих старых механических систем. Комбинация с UVGI и HEPA минимизирует риск нозокомиальной передачи туберкулёза, особенно в условиях высокого солнечного излучения (Узбекистан), где UV-компонент естественного света дополнительно инактивирует микобактерии.

Устойчивость и энергоэффективность. Пассивные меры (термальная масса + night purge, ориентация, затенение) в сочетании с солнечными элементами (PV-панели, солнечные коллекторы) позволяют существенно снизить зависимость от механических HVAC-систем. В литературе отмечается снижение энергопотребления больниц на 30–70 % при внедрении подобных решений. Для регионов с высоким солнечным потенциалом (1500–2000 кВт·ч/м² в год) возобновляемые источники обеспечивают 20–40 % покрытия нужд в электроэнергии и горячей воде, снижая углеродный след и операционные затраты. Это особенно актуально для Узбекистана в условиях роста тарифов на энергоносители и климатических изменений.

Общий эффект — создание «лечащей среды», где архитектура одновременно поддерживает выздоровление, предотвращает инфекции и минимизирует экологический и экономический ущерб. Несмотря на преимущества, предложенные подходы имеют ряд ограничений:

- **Климатические:** В условиях Ташкента естественная вентиляция эффективна в летний сухой период, но требует тщательного контроля зимой (холодные месяцы с высоким риском переохлаждения) и в переходные сезоны. Сильные пыльные бури (характерные для региона) могут снижать качество воздуха в зеленых зонах и требовать дополнительных фильтров. Большие суточные перепады температур благоприятны для night purge, однако экстремальная жара (>40 °C) может превышать возможности чисто пассивного охлаждения.
- **Экономические:** Начальные инвестиции в высококачественные материалы (термальная масса, системы затенения, HEPA/UVGI-модули, солнечные установки) выше, чем в традиционное строительство. Хотя окупаемость составляет 5–8 лет за счёт снижения энергозатрат, для бюджетных учреждений это может стать барьером. Обслуживание гибридных систем требует квалифицированного персонала.
- **Нормативные:** Действующие санитарно-эпидемиологические нормы Узбекистана и стран СНГ (наследующие советские стандарты) часто ориентированы на механические системы и могут не полностью учитывать преимущества естественной и гибридной вентиляции. Необходима актуализация норм с учётом рекомендаций ВОЗ (Natural Ventilation for Infection Control, 2009) и современных данных по биоклиматическому дизайну. Отсутствие обязательных требований по биофильным элементам и возобновляемой энергетике в медицинском строительстве замедляет внедрение.

Таблица 6.

Сравнение ключевых преимуществ предложенных стратегий с данными литературы.

Преимущество	Результаты настоящего исследования (RП / Mahoney)	Данные литературы (примеры)	Степень соответствия
Инфекционная безопасность (вентиляция)	RП = 0,94 (1-е место); 6–12+ АСН + HEPA/UVGI	Escombe et al. (2007): 28 АСН естественная vs 12 АСН механическая; снижение риска ТБ на 70 %+	Высокая
Предотвращение перегрева	RП = 0,91; 4 месяца перегрева по Mahoney	WHO (2009); пассивное охлаждение в жарких климатах (снижение t на 4–8 °C)	Высокая
Терапевтический эффект (биофильный дизайн)	RП = 0,79; внутренние дворы и озеленение	Ulrich et al.; исследования healing gardens в больницах	Средняя-высокая
Экономия энергии	Снижение на 30–60 % (моделирование)	Passive House для больниц; солнечные системы в развивающихся странах	Высокая
Гибридная вентиляция	RП = 0,74; приоритет экспертов	WHO (2009); гибридные системы как оптимальное решение для низкоресурсных условий	Высокая

Предложенный подход занимает промежуточное положение между традиционными механическими системами и передовыми международными примерами.

Рекомендации по естественной вентиляции для ТВ-контроля (Escombe, Atkinson, Hobday) активно применяются в Индии, Перу, Таиланде и Африке. Простые модификации (увеличение проёмов, cross-ventilation) значительно снижают риск передачи без высоких затрат — аналогично предлагаемой гибридной модели.

В Германии, Дании и других странах внедряют **Passive House**²³ для больниц с очень низким энергопотреблением, высокой изоляцией и контролируемой вентиляцией. Наш подход адаптирует эти принципы к более жаркому климату, делая акцент на проветривании и солнечной энергии. Проекты в США, Скандинавии и Сингапуре (healing gardens, views of

²³ **Passive House (пассивный дом)** — это стандарт энергоэффективного строительства, обеспечивающий максимально комфортный микроклимат при ничтожно малом потреблении энергии (на 80-90% меньше обычного). Он не требует традиционной системы отопления, сохраняя тепло за счет герметичности, сверхэффективной теплоизоляции и рекуперации воздуха

nature) подтверждают сокращение сроков пребывания и стресса. В фтизиатрии это особенно ценно, учитывая длительность лечения.

Отличие узбекского подхода диктует необходимость баланса между инфекционным контролем и климатической адаптацией в условиях ограниченных ресурсов, где чисто пассивные решения играют большую роль, чем в странах с умеренным климатом.

Возможные риски и меры их минимизации:

- Недостаточная вентиляция в «мёртвых зонах» или при неправильной эксплуатации (риск повышения концентрации аэрозолей).
- Перегрев или переохлаждение при экстремальных погодных условиях.
- Загрязнение воздуха от зеленых насаждений (пыльца, плесень) в биофильных зонах.
- Снижение эффективности солнечных систем зимой или при пыльных бурях.
- Несоответствие проектных решений реальной эксплуатации (человеческий фактор).

Основные меры контроля включают:

- Обязательное динамическое моделирование (EnergyPlus / DesignBuilder) на этапе проектирования с верификацией всех сценариев.
- Гибридные системы с автоматическим переключением (датчики CO₂, температуры, влажности) и резервными механическими вентиляторами.
- Интеграция биофильтров и контроля влажности в зеленых зонах; подбор растений с низкой аллергенностью.
- Обучение персонала и пациентов правилам эксплуатации (открытие проёмов, обслуживание фильтров).
- Мониторинг после ввода в эксплуатацию (индикаторы IAQ, энергопотребления, микробиологический контроль) в течение первых 2–3 лет.
- Поэтапное внедрение с пилотными блоками для отработки решений.

Комплексный подход к управлению рисками позволит реализовать преимущества биоклиматического проектирования фтизиатрических стационаров при сохранении высокого уровня безопасности и устойчивости.

Результаты исследования подтверждают, что интеграция биоклиматических стратегий с современными требованиями инфекционного контроля представляет собой перспективный путь развития фтизиатрической архитектуры в условиях Центральной Азии. Полученные данные выявляют ограничения, характерные для большинства исследований по естественной и гибридной вентиляции в здравоохранении:

Региональные климатические особенности выявили, что эффективность естественной вентиляции высока летом, но снижается зимой и при пыльных бурях (характерно для Центральной Азии). Анализ данных подчёркивает зависимость от погодных условий и рекомендует гибридные системы.

При этом существуют нормативные барьеры. Действующие санитарные нормы Узбекистана и стран СНГ преимущественно ориентированы на механические HVAC и требуют актуализации с учётом рекомендаций ВОЗ. Кроме этого, остаются риски инфекционной безопасности при естественной вентиляции.

В первую очередь в больницах наблюдается нестабильность воздухообмена при низкой скорости ветра или неправильной ориентации проёмов.

Кроме этого, возможно обратное течение воздуха и загрязнение от наружного воздуха/зелени, а также очень велик человеческий фактор при эксплуатации.

Заключение и рекомендации. Проведённое исследование подтвердило, что биоклиматический подход является наиболее эффективным и устойчивым решением для проектирования современных туберкулёзных стационаров в условиях континентального климата Центральной Азии, в частности Ташкента и аналогичных регионов Узбекистана.

Анализ таблиц Mahoney показал, что климат Ташкента характеризуется 4 месяцами выраженного дневного перегрева, значительным суточным перепадом температур (10–15

°С) и аридными условиями летом. Это создаёт идеальные предпосылки для применения пассивных стратегий: высокой тепловой массы стен и перекрытий, проветривания, ориентации здания по оси север–юг и интенсивной естественной/гибридной вентиляции.

Результаты экспертного опроса (N = 48) с использованием Relative Importance Index (RII) выявили чёткие приоритеты:

- вентиляция с обеспечением 6–12+ воздухообменов в час (RII = 0,94);
- предотвращение перегрева помещений (RII = 0,91);
- интеграция HEPA/UVGI (RII = 0,89).

Эти данные полностью согласуются с рекомендациями ВОЗ (2009, 2019) и эмпирическими результатами Escombe et al. (2007), которые продемонстрировали, что естественная вентиляция обеспечивает медианный воздухообмен 28 АСН и снижает риск аэрозольной передачи *Mycobacterium tuberculosis* в 3–4 раза по сравнению с традиционными механическими системами (модель Wells-Riley).

Предложенные гибридные биоклиматические стратегии (ориентация и затенение, термальная масса + проветривание, гибридная вентиляция с HEPA/UVGI, биофильные элементы и солнечные системы) одновременно решают три критические задачи:

1. инфекционную безопасность;
2. терапевтический эффект (биофильный дизайн, комфортная среда для пациентов с длительной госпитализацией);
3. устойчивость (снижение энергопотребления на 30–60 %, использование возобновляемых источников).

Таким образом, переход от устаревших энергоёмких механических систем к гибридным биоклиматическим решениям позволяет создать «лечащую архитектуру», которая активно способствует выздоровлению, минимизирует риски внутрибольничной передачи туберкулёза и обеспечивает долгосрочную экономическую эффективность.

Общие рекомендации по внедрению:

1. На предпроектной стадии **обязательно** проводить биоклиматический анализ с использованием таблиц Mahoney и динамического энергетического моделирования (EnergyPlus / DesignBuilder) для верификации воздухообмена (АСН), температурного режима и потоков воздуха.
2. Применять обязательную ориентацию здания по оси север–юг ($\pm 15^\circ$), **высокую тепловую массу**²⁴, проветривание и **cross/stack-вентиляцию**²⁵.
3. Проектировать **гибридные (mixed-mode)** системы вентиляции с гарантированными 12+ АСН в инфекционных зонах, обязательной интеграцией HEPA-фильтров (H13–H14) и верхнего UVGI.
4. Включать биофильные элементы (внутренние дворы, озеленение, виды на природу) как стандартный компонент с контролем влажности и аллергенов.
5. Интегрировать солнечные фотоэлектрические панели и коллекторы для покрытия не менее 20–30 % потребности в электроэнергии и горячей воде.

Реализация предложенных рекомендаций позволит Республике Узбекистан выйти на новый уровень проектирования туберкулёзных диспансеров, соответствующий международным стандартам ВОЗ, существенно снизить бремя внутрибольничных инфекций, улучшить качество жизни пациентов и добиться значительной экономии бюджетных средств на эксплуатацию.

Предложенный подход представляет собой адаптированную для условий Центральной Азии модель, которая успешно сочетает доказанные международные практики с локальными климатическими и экономическими реалиями. Его внедрение

²⁴ **Высокая тепловая масса** — это способность материалов (бетон, кирпич, камень, вода) поглощать, хранить и медленно отдавать тепловую энергию, стабилизируя температуру в помещении.

²⁵ **Кросс-вентиляция (сквозная) и стек-вентиляция (вытяжная/эффект дымохода)** — это энергоэффективные методы естественной вентиляции. Кросс-вентиляция использует ветер для горизонтального движения воздуха между противоположными окнами, а стек-вентиляция использует подъем теплого воздуха вверх для удаления застоявшегося воздуха через верхние проемы.

позволит значительно повысить эффективность фтизиатрических стационаров по критериям инфекционной безопасности, терапевтического воздействия и долгосрочной устойчивости. Биоклиматический и гибридный подход в проектировании фтизиатрических стационаров — это не только техническое решение, но и стратегический шаг к созданию современной, гуманной и устойчивой системы здравоохранения в условиях климатических изменений и высокой эпидемической нагрузки по туберкулёзу.

Список использованной литературы:

1. Escombe A.R., Otero L., Ticona E. et al. Improving natural ventilation in hospital waiting and consulting rooms to reduce nosocomial tuberculosis transmission risk in a low resource setting // PLoS ONE. – 2019. – Vol. 14(1). – e0210564. DOI: 10.1371/journal.pone.0210564.
2. Escombe A.R., Otero L., Ticona E. et al. Natural ventilation for the prevention of airborne contagion // PLoS Medicine. – 2007. – Vol. 4(2). – e68. DOI: 10.1371/journal.pmed.0040068.
3. Atkinson J., Chartier Y., Pessoa-Silva C.L. et al. (eds). Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings. – Geneva: World Health Organization, 2009. – 133 p.
4. Qian H., Li Y., Seto W.H. et al. Natural ventilation for reducing airborne infection in hospitals // Indoor Air. – 2010. – Vol. 20(1). – P. 3-10. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2009.00617.x.
5. Hobday R.A., Dancer S.J. Roles of sunlight and natural ventilation for controlling infection: historical and current perspectives // Journal of Hospital Infection. – 2013. – Vol. 84(4). – P. 271-282. DOI: 10.1016/j.jhin.2013.04.011.
6. Lygizos M., Shenoi S.V., Vining B. et al. Natural ventilation reduces high TB transmission risk in an HIV-endemic setting // International Journal of Tuberculosis and Lung Disease. – 2013. – Vol. 17(4). – P. 525-532.
7. Inkarojrit V. Natural Ventilation in Thai Hospitals: A Field Study // Proceedings of the 31st AIVC Conference. – 2010. – P. 766-771.
8. Emmanuel U., Osondu E.D., Kalu E.E. Architectural design strategies for infection prevention and control in health-care facilities: A review // Journal of Environmental Health Science & Engineering. – 2020. – Vol. 18(2). – P. 1395-1408. DOI: 10.1007/s40201-020-00580-y.
9. Nardell E.A. Indoor environmental control of tuberculosis and other airborne infections // International Journal of Tuberculosis and Lung Disease. – 2016. – Vol. 20(1). – P. 10-17.
10. Wilson P. Is natural ventilation a useful tool to prevent the airborne spread of TB? // PLoS Medicine. – 2007. – Vol. 4(2). – e77.
11. Olgyay V. Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. – Princeton University Press, 1963 (reprinted 2015).
12. Ulrich R.S. View through a window may influence recovery from surgery // Science. – 1984. – Vol. 224(4647). – P. 420-421.
13. Hamilton D.K. Evidence-based design for healthcare facilities. – Chicago: Health Administration Press, 2008.
14. Simonsen T., Sturge J., Duff C. Healing Architecture in Healthcare: A Scoping Review // Health Environments Research & Design Journal. – 2022. – Vol. 15(2). – P. 123-145. DOI: 10.1177/19375867211072513.
15. Cho M. Evaluating Therapeutic Healthcare Environmental Criteria // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2023. – Vol. 20(2). – 986.
16. Campbell M. What Tuberculosis did for Modernism: The Influence of a Curative Environment on Modernist Design and Architecture // Medical History. – 2005. – Vol. 49(4). – P. 463-488.
17. O'Rourke K.E. José Villagrán García and the tuberculosis sanatorium at Huipulco, Mexico // Journal of the Society of Architectural Historians. – 2012. – Vol. 71(1). – P. 60-77.

18. Verderber S. *Innovations in Hospital Architecture*. – Routledge, 2010.
19. Beccali M., Strazzeri V., Germanà M.L. et al. Vernacular and bioclimatic architecture and indoor thermal comfort implications in hot-humid climates: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 82. – P. 1726-1740.
20. Maciel A.A. *Bioclimatic Integration into the Architectural Design Process*. – PhD Thesis, Federal University of Santa Catarina, 2007.
21. Taing K. *Bioclimatic Design Guidelines for Design Decision Support to Enhance Residential Building Thermal Performance in Tropical Regions* // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17(4). – 1591.
22. Nigra M., Barbero A., De Medici S. Passive design approach for infectious diseases treatment centers in the Global South: A possible methodology // *Journal of Urban and Environmental Engineering*. – 2023.
23. Shi Y., Wang Y., Li Z. et al. A framework for optimizing the indoor spatial layout of hospital buildings to enhance natural ventilation // *Journal of Building Engineering*. – 2025. – Art. 112345.
24. Nikoopayan Tak M.S. *Ventilation and Infection Control in Healthcare Facilities: A Review* // *Hygiene*. – 2025. – Vol. 3(4). – 30.
25. Anderson A.M. *Airflow and Airborne Disease Transmission in Healthcare Facilities*. – MIT Thesis, 2018.
26. Ежов В.В. Климатолечение на приморских курортах в современной медицинской и оздоровительной практике // *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*. – 2021. – Т. 98. – № 3. – С. 60-68.
27. Бокша В.Г. Дыхательная недостаточность при туберкулезе легких и влияние на нее физических природных факторов: Дис. ... д-ра мед. наук. – Ялта, 1971.
28. Тычинина А.П. и др. Терапевтический потенциал климата федерального курорта Ессентуки // *Современные вопросы бальнеологии и курортологии*. – 2025. – Т. 9. – № 3. – С. 194-200.
29. Корягина Ю.В. и др. Лечебно-климатический потенциал территории расположения курорта федерального значения Сочи. – М.: ФГБУ СКФНКЦ ФМБА России, 2024.
30. Шалыгин Н. *Природные лечебные факторы и средства в курортологии*. – М., 2018.
31. Беликов М.Ю. (ред.). *Формирование рекреационной среды на урбанизированных территориях Уральского региона*. – Екатеринбург: Уральский университет, 2020.
32. Тищakov А.Ю. Научные основы вариантной климатобальнеотерапии больных с заболеваниями сердечно-сосудистой системы: Дис. ... д-ра мед. наук. – 2006.
33. Ковлен Д.В. Климатотерапия пациентов с хронической сердечной недостаточностью: Дис. ... канд. мед. наук. – 2006.
34. Голич Л.Г. Сильноуглекислые железистые ванны в комплексном санаторно-курортном лечении больных хроническими обструктивными заболеваниями легких. – 2005.
35. Кузнецов В.М. Вариантная климатотерапия больных с нейроциркуляторной дистонией по гипертоническому типу: Дис. ... канд. мед. наук. – 2005.
36. Латышев Г.Д., Бокша В.Г. Биоклиматические индексы для оценки погодных условий в курортологии. – Ялта: Ялтинский НИИ, 1970–1980-е гг.
37. Орехова Е.Г. Влияние климата на вегетативный статус. – 2004.
38. Щербаков Д.Б., Ивлев С.М. Климатотерапия при соматоформных расстройствах. – 2004–2009.
39. Потапов А.И. и др. *Здоровье населения и проблемы гигиенической безопасности*. – М.: Инфра-М, 2006.
40. Авдеев С.Н. и др. *Хроническая обструктивная болезнь легких*. – М., 2003.

41. Чучалин А.Г. Хроническая обструктивная болезнь легких: современные подходы. – 1999–2003.
42. Шмелев Е.И. Туберкулез и болезни органов дыхания. – 2003.
43. Кику П.Ф., Веремчук Л.В. Эколого-зависимые заболевания органов дыхания на Дальнем Востоке. – 2004.
44. Луценко М.Т. Социально-гигиеническая характеристика хронического бронхита и ХОБЛ в условиях Дальнего Востока. – 2006.
45. Сидорова А.А. Становление в Крымском Симеизе противотуберкулезного курорта СССР // Культура и образование. – 2019. – № 2.
46. Савченко В.М., Ярош А.М., Шатров А.А. и др. История развития и проблемы климатотерапии на Южном берегу Крыма.
47. Мушкин А.Ю., Галкин В.Б. Детский туберкулезный санаторий «Кирицы»: климат и лечебные подходы. – 2024.
48. Медицинская оценка климата и климатолечения больных туберкулезом легких на курорте Теберда: Автореф. дис. ... канд. мед. наук.
49. Применение универсальной дыхательной трубы для плавания (русский snorkel) в физической реабилитации больных туберкулезом.
50. О совершенствовании санаторно-курортной и курортной помощи (Приказ Минздравмедпрома РФ от 19.07.96 № 291).
51. Aalto A. Paimio Sanatorium (Tuberculosis Sanatorium in Paimio, Finland, 1929–1933). – Alvar Aalto Foundation, 1933 (historical project documentation).
52. Duiker J. Sanatorium Zonnestraal (1928–1931) – Early modernist TB sanatorium.
53. Schmieden H., Boethke J. Beelitz Tuberculosis Sanatorium (1898) – Historical documentation.
54. Ganster W., Pereira W. Lake County Tuberculosis Sanatorium (1939).
55. Berk C. A tuberculosis sanatorium for Istanbul, Turkey. – MIT M.Arch. Thesis, 1947.
56. AbdelMeguid S.M. Biophilic Design Strategies for Hospitals Retrofit. – IUSD Thesis, 2014.
57. CDC. Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities. – Atlanta: CDC, 2003.
58. WHO. Guidelines for the prevention of tuberculosis in healthcare facilities (various editions).
59. Li Y., Leung G.M., Tang J.W. et al. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment // Indoor Air. – 2007. – Vol. 17(1). – P. 2-18.
60. Timmermann C. User consultation and the design of healing architecture in Danish hospitals // Design Issues. – 2020. – Vol. 36(1). – P. 45-58.