

УДК 697.34:528.946
DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4443
Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Система мониторинга теплопотребления зданий

М.В. Колосов✉, А.Ю. Липовка, Ю.Л. Липовка

Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

✉MKolosov@sfu-kras.ru

Аннотация. Актуальность. Потребление энергии и эффективное использование сетей централизованного теплоснабжения влияют на окружающую среду, общество и экономику. Необходимы решения, которые позволят существенно снизить удельные потери тепловой энергии. Использование технически и экономически целесообразного способа оценки энергоэффективности позволят планировать мероприятия по рациональному использованию энергетических ресурсов. В настоящее время оценка энергоэффективности зданий вызывает существенные вопросы у специалистов. Современной специализированной литературы по данному направлению не так много. Проблема энергоэффективности требует более строгого внимания к решению вопросов градостроительства. Таким образом, уточненные методы оценки энергоэффективности зданий позволяют одновременно и экономить капиталовложения, и обеспечивать эффективное потребление тепловой энергии. **Цель:** разработка системы оценки реального теплопотребления зданий для обеспечения оптимизации диспетчеризации систем централизованного теплоснабжения в режиме реального времени. **Методы:** компьютерное моделирование состояния теплового потребления зданий с различными характеристиками и схемами их присоединения к сетям централизованного теплоснабжения; методы геоинформационного анализа. **Результаты.** Предложена система мониторинга теплопотребления зданий, позволяющая оценивать энергоэффективность зданий за счет максимального использования компьютерных и программных технологий. Показано, что расчетные тепловые потоки зданий, используемые для прогнозирования экономики при модернизации зданий, не всегда соответствуют фактическим тепловым нагрузкам, что может приводить к неверной оценке инвестиционных проектов. Получены графические зависимости величин, влияющих на удельные тепловые потери, от различных первичных независимых факторов. **Выводы.** Построенная система мониторинга теплопотребления зданий позволяет, вместе с использованием методов геоинформационного анализа, получать достаточно полную картину состояния теплопотребления для участков города и оценку энергетических характеристик зданий.

Ключевые слова: теплопотребление, геоинформационные системы, энергоэффективность, тепловой пункт, тепло-гидравлический режим, автоматизированное управление, компьютерный мониторинг

Для цитирования: Колосов М.В., Липовка А.Ю., Липовка Ю.Л. Система мониторинга теплопотребления зданий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 7. – С. 206–220. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4443

UDC 697.34:528.946
DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4443

System for monitoring building heat consumption

M.V. Kolosov✉, A.Yu. Lipovka, Yu.L. Lipovka

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉MKolosov@sfu-kras.ru

Abstract. Relevance. Energy consumption and efficient use of district heating networks affect the environment, society and the economy. Solutions are needed that can significantly reduce specific thermal energy losses. Using a technically and economically feasible way to assess energy efficiency allows these decisions to be made. Currently, assessing the energy efficiency of buildings raises significant questions among specialists. There is not much modern specialized literature in this area.

The problem of energy efficiency requires more rigorous attention to urban planning issues. Thus, refined methods for assessing the energy efficiency of buildings make it possible to simultaneously save capital investments and ensure efficient consumption of thermal energy. **Aim.** To develop a system for assessing the real heat consumption of buildings to ensure optimization of dispatching of centralized heat supply systems in real time. **Methods.** Computer modeling of the state of heat consumption of buildings with various characteristics and schemes for their connection to centralized heat supply networks; methods of geographic information analysis. **Results.** The authors have proposed the system for monitoring the heat consumption of buildings. This system allows assessing the energy efficiency of buildings through the maximum use of computer and software technologies. It is shown that the calculated heat flows of buildings used to predict savings when modernizing buildings do not always correspond to the actual heat loads, which can lead to an incorrect assessment of investment projects. The authors obtained graphical dependences of the quantities influencing specific heat losses on various primary independent factors. **Conclusions.** The constructed system for monitoring the heat consumption of buildings allows, together with the use of geoinformation analysis methods, obtaining a fairly complete picture of the state of heat consumption for city areas and an assessment of the energy characteristics of buildings.

Keywords: heat consumption, geographic information systems, energy efficiency, heating point, thermal-hydraulic mode, automated control, computer monitoring

For citation: Kolosov M.V., Lipovka A.Yu., Lipovka Yu.L. System for monitoring building heat consumption. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 7, pp. 206–220. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4443

Введение

Повышение эффективности зданий является ключом к решению проблем изменения климата, учитывая, что на здания приходится 40 % мирового потребления энергии [1]. Срочная потребность в повышении энергоэффективности требует на начальной стадии внедрения подходящих инструментов мониторинга энергетических параметров зданий. Такие системы должны быть внедрены для повышения осведомленности об эксплуатационных характеристиках здания среди владельцев и арендаторов и для мотивации улучшения показателей, а также для обеспечения того, чтобы эксплуатационные характеристики строительного фонда соответствовали национальным требованиям и более широкой энергетической политике [2].

Проблема энергоэффективности

Цели энергетической и климатической политики для строительного сектора часто основываются на оценке и улучшении энергетических характеристик зданий, таких как нормируемая (базовая) удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий. Поэтому очень важно определить, в какой степени они могут считаться надежными инструментами для достижения этой цели. Разрыв в энергетических характеристиках, при условии, что они являются надежным индикатором измеренного энергопотребления зданий, обычно определяемый как разница между ожидаемым потреблением энергии, рассчитанным при оценке эффективности здания, и фактическим потреблением, представляет собой серьезную проблему для достижения целей в области энергоэффективности [3, 4]. Теоретическое потребление энергии используется для прогнозирования экономии при модернизации зданий, что не соответству-

ет фактическому потреблению энергии и, в свою очередь, приводит к неверной оценке инвестиционных проектов.

На энергоэффективность здания влияет несколько взаимосвязанных факторов, что делает особенно трудным определение и количественную оценку влияния каждого отдельного из них. Обычный подход к оценке энергоэффективности заключается в выполнении полевых измерений для получения значений параметров модели на основе фактических условий эксплуатации, чтобы улучшить прогнозирование фактического использования энергии, тем самым снижая уровень неопределенности результатов [5]. Чтобы значительно снизить энергопотребление, важно учитывать уровень обслуживания, который должны обеспечивать здания [6], то есть поддержание параметров, соответствующих оптимальному потреблению для каждого здания, при котором достигается эффективность и комфорт, принимая во внимание реалистичное использование здания.

Оптимальные энергетические характеристики здания зависят от определенных проектных допущений, таких как заданная температура, графики регулирования и производительность технических систем. Однако многие из этих предположений зачастую неприменимы из-за неисправности систем здания, неоптимального использования жильцами тепловой энергии или по другим причинам. Неисправное оборудование наиболее распространенная проблема, когда разница между теоретическим и фактическим потреблением вызвана не проблемами моделирования или сбора данных, а реальной технической проблемой в здании [7]. Примеры технических проблем многочисленны и разнообразны, что подчеркивает критическую важность мониторинга и обслуживания инженерных систем зданий [8].

На энергетические характеристики здания в значительной степени влияет качество строительства, которое трудно учесть на этапе проектирования, что приводит к отклонениям от проектных спецификаций, особенно в отношении изоляции и герметичности [9]. Строительные системы отопления, вентиляции и кондиционирования, особенно для инновационных систем (например, интеллектуального управления зданием), часто страдают от сбоев систем управления и отсутствия точной настройки стратегий управления. Тонкая настройка может быть опущена разработчиком проекта, но даже если она выполняется, результаты могут быть разочаровывающими, потому что правильное выполнение требует много времени, а реализация в соответствии с современным уровнем техники может конфликтовать с запросами жителей. Неэффективная эксплуатация здания увеличивает потребление энергии на 50–80 % по сравнению с исходным уровнем, в то время как эффективная практика может сэкономить 15–30 %. Однако это зависит от наличия у менеджеров доступа к информации и инструментам для применения оптимизации – без них ожидания по оптимизации вряд ли будут оправданы [10].

Открытие окон, управление затенением, освещением и температурой в помещении существенно влияет на энергоэффективность зданий в целом. Наглядным примером является противоречивое использование термостатических клапанов, установленных на максимум, при одновременном сохранении окон в наклонном положении в течение всего дня, в основном для противодействия перегреву в помещении, что приводит к увеличению фактического потребления до двух раз [11]. Однако поведение жильцов и его влияние на потребление энергии предсказать сложно [12]. Большая часть потребления энергии в домах, офисах и коммерческих помещениях связана с устройствами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Чтобы снизить энергопотребление систем отопления, вентиляции и кондиционирования необходимо точно прогнозировать бытовые теплопоступления. Внедрение таких моделей может привести к созданию теоретической базы для ученых и инженеров для улучшения прогнозистического управления системами отопления, вентиляции и кондиционирования, что играет важную роль в повышении теплового комфорта и энергосбережении жилых зданий [13].

Прогнозирование

Эффективный и точный прогноз энергопотребления здания может улучшить управление энергосистемами. В [14] теория грубых множеств использовалась для уменьшения избыточных факторов, влияющих на энергопотребление здания, и нахож-

дения критических факторов энергопотребления здания.

Эффективная работа сетей централизованного теплоснабжения также требует точного прогнозирования тепловых нагрузок и оптимизированной стратегии диспетчеризации для доступного портфеля генерации и хранения. Чтобы обеспечить оптимизацию диспетчеризации в режиме реального времени, в [15] был разработан и оценен метод прогнозирования тепловой нагрузки на основе машинного обучения. Экономическое влияние неопределенностей прогноза должно анализироваться с помощью численного инструмента оптимизации диспетчеризации.

Методологии прогнозирования энергопотребления зданий, используемые муниципальными властями, как правило, в значительной степени ориентированы на отображение более широких качественных представлений региональных изменений и нуждаются в дополнительных моделях, основанных на данных, которые могут обеспечить количественные достоверные изображения будущего энергопотребления на уровне района [16]. Модель коммерческого использования энергии может быть разработана на основе наборов данных геоинформационных систем (ГИС), данных исследования энергопотребления коммерческих зданий и данных о коммерческой недвижимости. В модели также используются результаты обследования энергопотребления в жилых помещениях, выборки микроданных для общественного пользования и оценок обследования переписи населения. Далее необходимо провести анализ для точного определения вклада признаков в оценки результатов модели.

Подготовка данных

В последнее десятилетие в энергоэффективность систем теплоснабжения были вложены значительные усилия. Было опубликовано несколько наборов данных о потреблении энергии, причем каждый набор данных различался по свойствам, использованию и ограничениям. Например, модели энергопотребления зданий получают данные из нескольких источников, включая условия окружающей среды, занятость пользователей, погодные условия и предпочтения потребителей. Таким образом, правильное понимание имеющихся наборов данных создаст прочную основу для повышения энергоэффективности. На основе аналитических исследований можно представить набор данных для обнаружения аномалий энергопотребления [17]. Последнее будет очень полезно для тестирования и обучения алгоритмов обнаружения аномалий и, следовательно, сокращения потерь энергии.

В целом рост строительной отрасли серьезно ограничен тем, что она является одной из наименее

оцифрованных отраслей в мире [18], что затрудняет решение проблем, с которыми она сталкивается в настоящее время. Передовые цифровые технологии, например искусственный интеллект (ИИ), в настоящее время революционизируют многие отрасли и успешно применяются для повышения прибыльности, эффективности и безопасности. Несмотря на признание преимуществ такого рода технологий, в строительной отрасли все еще существуют многочисленные проблемы, связанные с их внедрением. В статье [19] выполнен обзор причин и решений проблем с отставанием в энергоэффективности жилых зданий для поиска оптимального потребления.

Энергетическое моделирование городских зданий привлекает все большее внимание в области энергетического моделирования из-за присущих ему возможностей моделирования целых городов или строительных фондов, а также потенциала различных входных данных, подходов и приложений [20]. Для дальнейшего совершенствования моделирования также предлагается провести дополнительные исследования социально-экономических параметров, таких как доход домохозяйства и демографические данные.

Для прогнозирования вероятности избыточного потребления энергии для различных функциональных переменных возможно применение модели пропорциональных рисков. Результаты исследования модели дают необходимую информацию, позволяющую установить критерии проектирования и реконструкции зданий [21].

Мониторинг

Оценка эффективности здания с помощью энергетических сертификатов важна для отслеживания и повышения энергоэффективности фонда зданий. Точность этих оценок имеет решающее значение для достижения будущих целей в области энергетики. Одной из таких оценок является понятие «оптимального» потребления, в отличие от «теоретического» (т. е. рассчитанного по стандартам) и «фактического» (т. е. измеренного) потребления, оно позволяет более строго классифицировать потенциальные решения для повышения энергетической эффективности. Этого можно добиться за счет улучшения мониторинга, обслуживания и общего использования здания.

Оптимальное управление системой отопления, вентиляции и кондиционирования в зданиях можно рассматривать как непростую задачу. Отсутствие данных не позволяет понять, как различные стратегии влияют на тепловой комфорт и потребление энергии [22], а также как энергоэффективность системы отопления чувствительна к стратегиям управления. Чтобы оценить фактическую работу и энергопотребление систем здания в реальных усло-

виях можно воспользоваться имитационной моделью здания и его систем с помощью имитационного моделирования энергопотребления, которая может быть откалибрована в соответствии с реальными данными мониторинга.

Мониторинг тепловых потерь зданий и быстрое обнаружение зданий с высоким энергопотреблением в определенной области имеет большое значение для отделов городского управления, чтобы предлагать меры городского управления и управления с точки зрения глобальной оптимизации [23].

В [24] представлены результаты анализа данных приборного учета тепловой энергии в существующих зданиях. Разработаны предложения по совершенствованию режимов теплопотребления в существующем жилом фонде, включая направления современного интеллектуального управления инженерными системами зданий с целью создания рациональной стратегии развития энергосистем: системы автоматизированного учета, мониторинга и управления.

В [25] предложен подход к анализу структуры энергопотребления и комплексному решению задач энергосбережения отапливаемых зданий посредством компьютерного мониторинга режимов работы действующей тепловой сети. Произведен анализ показателей энергоэффективности реального объекта теплопотребления, на основе которого предложена методика определения возможностей повышения качества работы систем автоматизированного управления в теплоснабжении.

ГИС и сети

Градостроители и политики сталкиваются с серьезными проблемами при достижении целей в области устойчивой энергетики и климата, связанных с сокращением энергопотребления и, следовательно, выбросов [26–28]. Моделирование потоков энергии в городах является одним из возможных решений, позволяющих использовать ограниченные ресурсы для оценки энергопотребления зданий и поддержки формирования соответствующей политики [29, 30].

В статье [31] описываются причины создания инструментария для исследования живучести систем энергетики с помощью возможностей геоинформационных технологий. Описывается метаматематическая модель системы и ее разделение на основные составляющие: топологическую и функциональную, где структурная модель отражает топологию энергетической сети в виде графа, а функциональная модель оценивает производительность с учетом как топологических возможностей, так и функциональных ограничений. Рассматриваются примеры использования геоинформационных систем в исследовании живучести и описания требо-

ваний при разработке инструментария для новой метаматематической модели. Новый инструментарий предполагает использование архитектуры «модель–представление–контроллер», что позволяет модифицировать каждый компонент независимо от другого. Данная архитектура также помогает «отвязать» топологическую и функциональную составляющие посредством инкапсуляции топологической модели в виде отдельного графа, а для связи с функциональной составляющей использовать контроллер. Это дает возможность использовать разные типы функциональных моделей без изменения топологической модели.

Продолжающийся переход городов к безуглерожным энергетическим системам привлекает внимание к методам энергетического планирования. Сложность городских энергетических систем требует обработки разнородных данных и привлечения множества участников процесса планирования [32]. Энергетическая пространственная характеристика территории, которая может быть представлена с помощью ГИС технологий, является основой для анализа краткосрочных и долгосрочных сценариев [33].

В исследовании [34] предлагается применение модели для оценки общего энергопотребления существующих городских кварталов, которая может быть полезна при планировании стратегий повышения энергопотребления в городских масштабах. Применение таких моделей может быть взаимосвязано с использованием программного инструментария ГИС, что дает возможность выполнять энергетическое картографирование городских кварталов.

Градостроители, местные органы власти и лица, определяющие политику в области энергетики, часто разрабатывают стратегические планы устойчивой энергетики для городского фонда зданий, чтобы свести к минимуму общее потребление энергии и выбросы. Планирование в таких масштабах может быть основано на моделировании запасов зданий с использованием существующих данных о зданиях и картографирования на основе географической информационной системы [35]. Однако реализация этих процессов связана с несколькими проблемами, а именно с доступностью данных, несогласованностью данных, масштабируемостью данных, интеграцией данных, геокодированием и конфиденциальностью данных. Моделирование на основе географической информационной системы помогает заинтересованным сторонам определить приоритетные области для реализации мер по повышению энергоэффективности.

В [36] представлена новая методология оценки энергетической и экономической целесообразности новых сетей централизованного теплоснабжения в существующих городских районах. Методология

состоит из инновационной многоступенчатой процедуры с использованием географических информационных систем и инструментов анализа данных.

В [37] ставят задачу оптимального распределения тепловых ресурсов по пространственно-распределенной сети. Решение этой проблемы гарантирует эффективное использование тепловых ресурсов и способствует созданию углеродно-нейтральных энергетических систем.

Задачи статьи

Суровые климатические условия России обуславливают высокую социальную и экономическую значимость теплоснабжения потребителей. В соответствии с этим качественный мониторинг состояния и планирование развития теплоснабжения страны и ее регионов являются стратегическим вектором научных исследований и процесса выработки и принятия решений по организации эффективного энергоснабжения потребителей [38].

Разработанные предложения

Системы мониторинга имеют решающее значение для выявления проблем с энергоэффективностью зданий. Для мониторинга показателей эффективности объектов теплоснабжения в реальном времени была разработана информационно-аналитическая система, основанная на облачных технологиях с доступом через веб-интерфейс. Система мониторинга построена с использованием архитектуры «модель–представление–контроллер», что позволяет использовать различные источники данных при анализе показателей энергоэффективности.

Для примера рассмотрим данные независимой закрытой системы теплоснабжения здания за год. График суточного теплового потребления Q рассматриваемой системы здания совместно с среднесуточной температурой наружного воздуха $T_{нв}$ представлен на рис. 1.

Для выбранной системы теплоснабжения представим анализ температурного режима. На рис. 2 приведены среднесуточные температуры подающего T_1 и обратного T_2 трубопроводов сезонной нагрузки (отопления и вентиляции), а также температура обратного трубопровода в соответствии с заданным графиком температур – T_2 по графику.

В соответствии с правилами технической эксплуатации тепловых энергоустановок среднесуточная температура обратной сетевой воды не должна превышать заданную температурным графиком температуру более чем на 5 %. На рис. 3 представлен график превышения температур теплоносителя обратного трубопровода заданной системы, из которого видно, что за выбранный период наблюдалось нарушение температурного режима.

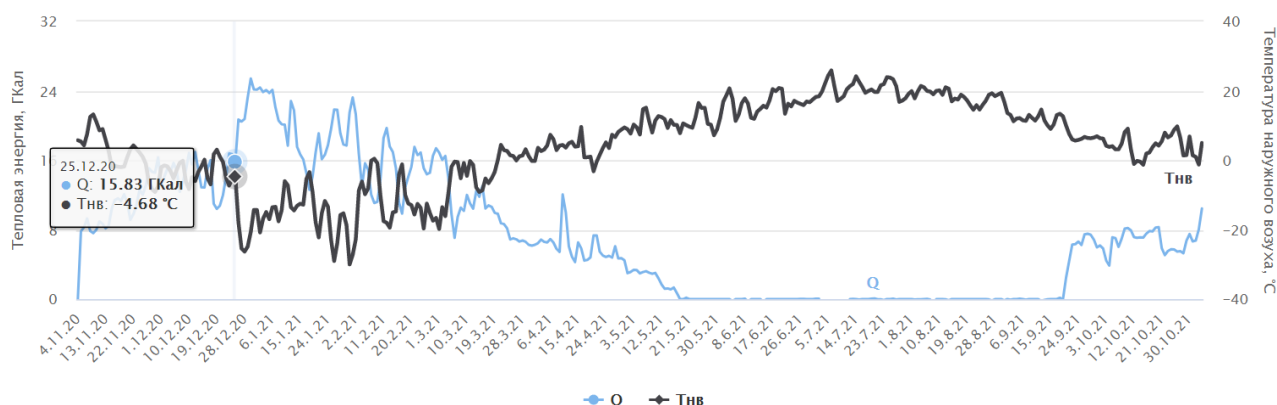


Рис. 1. График теплового потребления рассматриваемой системы здания
Fig. 1. Graph of heat consumption of the building system under consideration

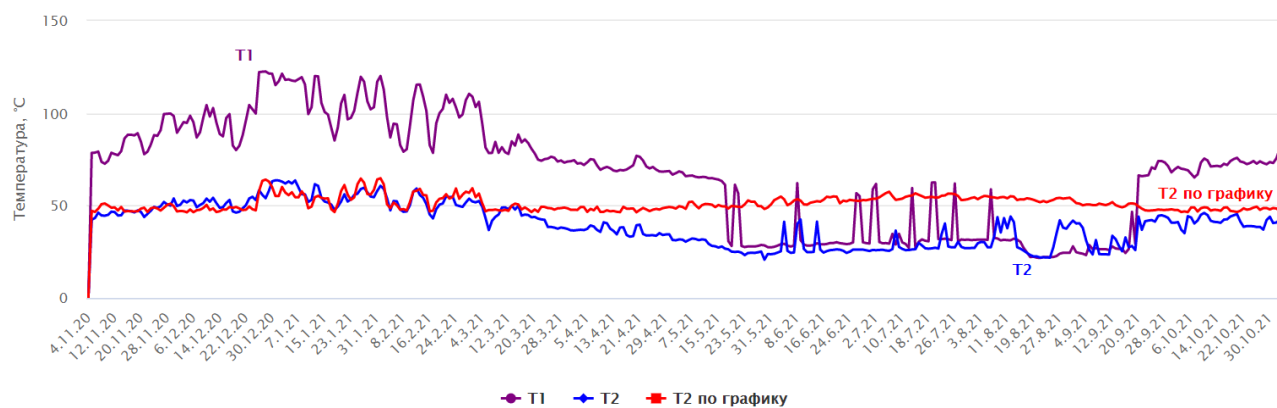


Рис. 2. График температур рассматриваемой системы здания
Fig. 2. Temperature graph of the building system under consideration



Рис. 3. График превышения температур теплоносителя обратного трубопровода рассматриваемой системы здания
Fig. 3. Graph of excess temperatures of the coolant in the return pipeline of the building system under consideration

На рис. 4 представлен график расхода теплоносителя в подающей V1 и обратной V2 линии системы отопления и вентиляции здания. Из графика видно, что разница между расходом в подающем и

обратном трубопроводах не превышает допустимую, при учете отсутствия теплopotребления в системе отопления и вентиляции в летний период.

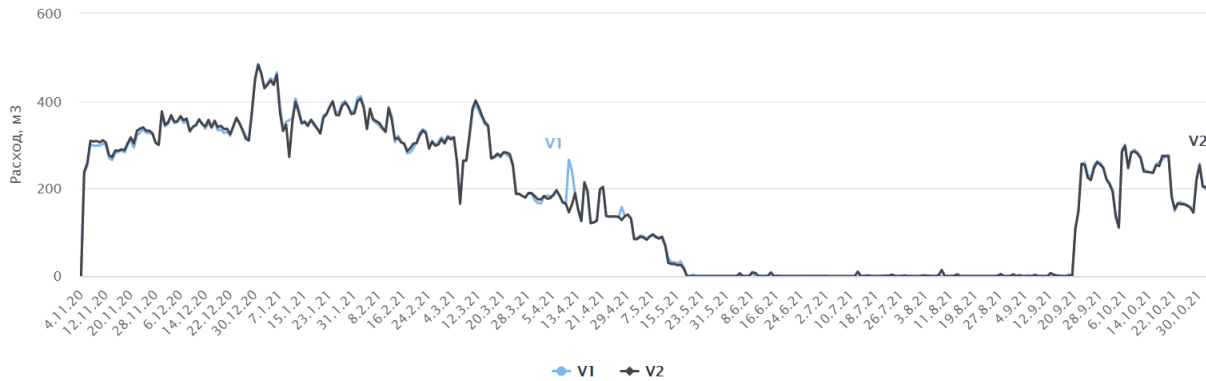


Рис. 4. График расхода теплоносителя рассматриваемой системы здания
Fig. 4. Graph of coolant consumption of the building system under consideration

Усредненную удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания для действующего объекта можно определить на основании показаний прибора учета тепловой энергии, установленного на здании. Для этого необходимо отнести количество тепловой энергии, полученной объектом за период усреднения, к усредненной разнице между температурой внутреннего воздуха здания и температурой наружного воздуха, а также к отопляемому объему здания:

$$q = \frac{Q_{\text{уч.}}}{(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) \cdot V \cdot \tau} \approx \frac{k \cdot F}{V},$$

где q – удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, Вт/м³·К; $Q_{\text{уч.}}$ – интегральные показатели теплового потребления для периода усреднения, Дж; V – отопляемый объем здания, м³; τ – период усреднения, сек; F – площадь ограждающей поверхности здания, м²; k – коэффициент теплопередачи, Вт/м·К.

Однако есть существенные разночтения по поводу определения отопляемого объема здания. Базовые значения удельных годовых расходов от-

носятся на 1 м² площади, не отнесенной к общему имуществу здания, которая на 30–50 % меньше отопляемой площади. В связи с вышесказанным, а также из-за сложности получения достоверных данных о фактическом значении отопляемого объема здания, исключим отопляемый объем здания из уравнения, введя понятие удельного теплопотребления:

$$q = \frac{Q_{\text{уч.}}}{(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) \cdot \tau}.$$

Удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания принимается величиной постоянной, при этом класс энергосбережения жилых и общественных зданий присваивается и подтверждается не чаще одного раза в год. Рассмотрим изменение удельного теплопотребления рассматриваемой системы, которое качественно определяет удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания при неизменном отопляемом объеме здания. График удельного теплопотребления q рассматриваемой системы представлен на рис. 5.

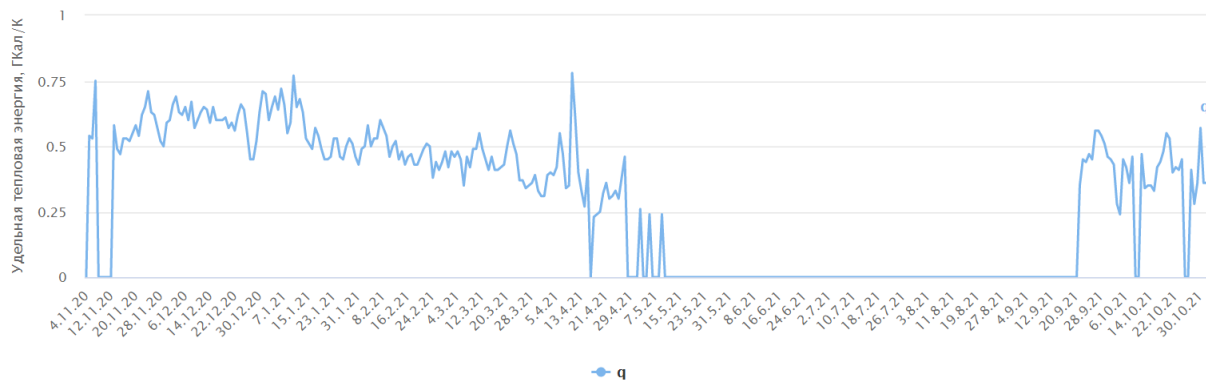


Рис. 5. График удельного теплопотребления рассматриваемой системы здания
Fig. 5. Graph of specific heat consumption of the building system under consideration

Из графика можно заметить, что удельное теплоснабжение рассматриваемой системы здания непостоянно. Большие колебания значений удельного теплоснабжения здания говорят о проблемах в настройке системы управления теплоснабжением данного здания, что негативно влияет на его общую энергоэффективность. На рис. 6 представлен график относительного удельного теплоснабжения q рассматриваемой системы здания. Данный график построен относительно некоторого среднего значения показателя удельного теплоснабжения, который может в полной мере удовлетворить потребителей в тепловой энергии. Из графика видно, что величина относительного удельного теплоснабжения рассматриваемой системы здания в некоторых случаях изменяется более чем в полтора раза.

Конечно, не для всех зданий характерно такое поведение данного показателя, но, к сожалению, большинство зданий не может похвастаться достаточной настройкой системы управления теплоснабжением для обеспечения параметров, соответствующих оптимальному потреблению, при кото-

ром достигается высокая энергоэффективность и комфорт таких систем. На рис. 7 приведен график относительного удельного теплоснабжения q системы альтернативного здания с похожей конструкцией и отапливаемым объемом здания. Из графика видно, что данная система имеет гораздо меньшее значение колебаний относительного удельного теплоснабжения, что свидетельствует о лучшей, по сравнению с рассматриваемой системой, настройке управления.

Разработанная система мониторинга и анализа параметров позволяет для каждого здания получить величину отклонения показателя удельного теплоснабжения здания от некоторого «оптимального» потребления, что, в свою очередь, помогает при принятии решений по повышению эффективности энергоснабжения потребителей.

Система мониторинга также включает в себя систему прогнозирования теплоснабжения на основании исторических данных с использованием систем ИИ, что позволяет упростить процесс обнаружения аномалий, а также демонстрирует эффективность энергосберегающих мероприятий.

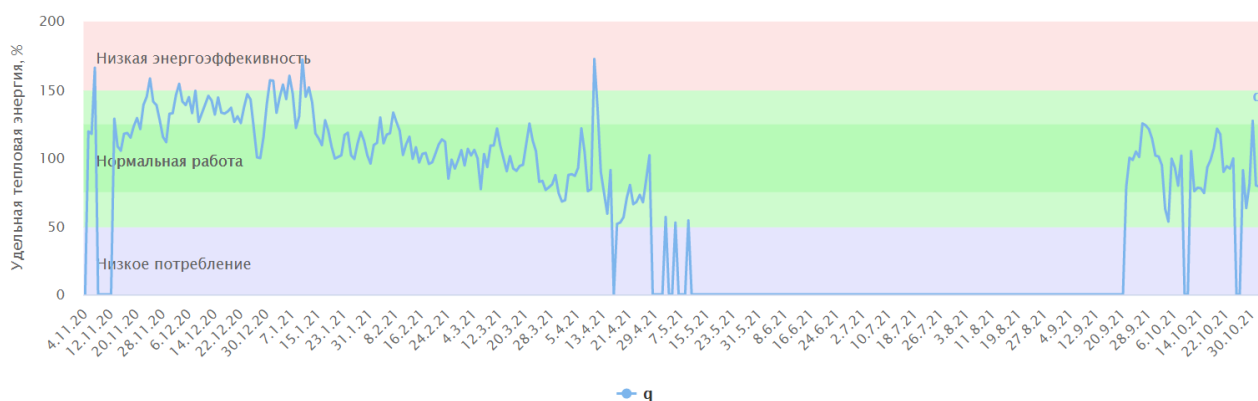


Рис. 6. График относительного удельного теплоснабжения рассматриваемой системы здания
Fig. 6. Graph of the relative specific heat consumption of the building system under consideration

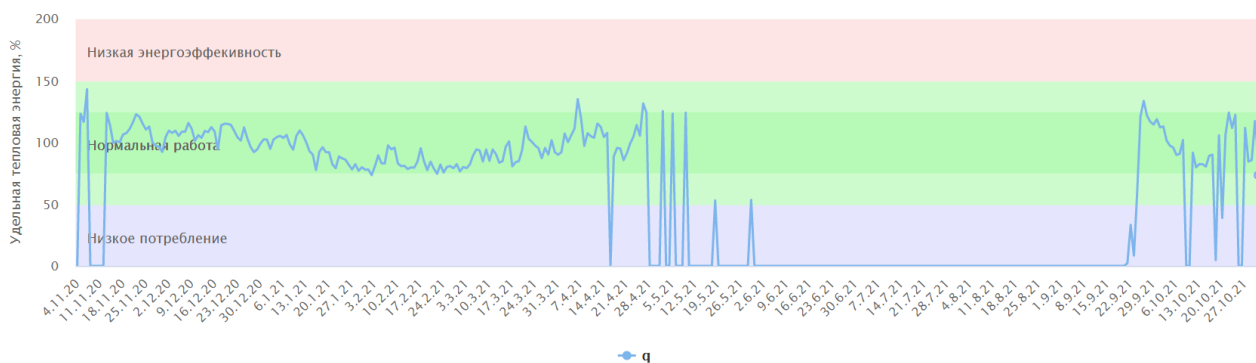


Рис. 7. График относительного удельного теплоснабжения системы альтернативного здания
Fig. 7. Graph of relative specific heat consumption of an alternative building system

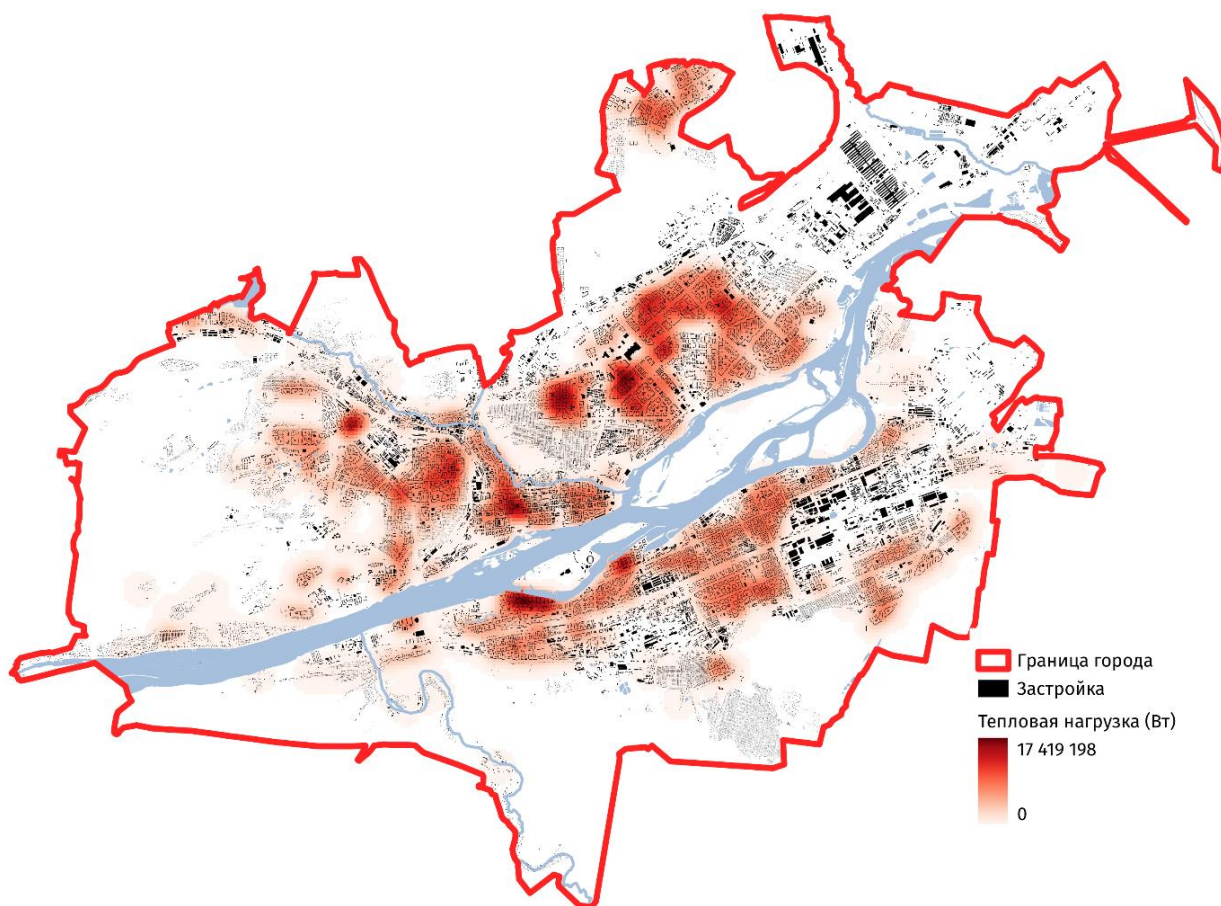


Рис. 8. Распределение тепловой нагрузки многоквартирного жилого фонда
Fig. 8. Distribution of heat load of multi-apartment housing stock

Геоинформационные системы позволяют в наглядном виде на картографической подложке отображать режим тепловых сетей и тематически визуализировать отдельные параметры (тепловые нагрузки, расход и скорость теплоносителя, температурный график и другие). С использованием геоинформационных технологий можно делать обобщенные выводы по тепловым картам, оверлейные операции для маркирования зон теплоснабжения, графовые алгоритмы с интерполяцией для отображения распределения тепловой энергии и сравнения с расчетным эффективным радиусом теплоснабжения, а также возможно абстрагирование через оверлейные операции над различными сетками (к примеру, над гексоидами). Также оверлейные операции позволяют получать суммарную статистику по различным территориям (площадь застройки в пределах зоны теплоснабжения, предельные отметки рельефа, административные единицы) и проводить технический анализ через построение буферов предельной близости от жилых зданий, кромок проезжей части и других объектов.

Был проведен сравнительный анализ обобщенной тепловой нагрузки жилой застройки, рассчи-

танной на основе открытых данных и данных системы мониторинга, который представлен на рис. 8.

За картографическую основу были взяты материалы некоммерческого веб-картографического проекта OpenStreetMap, откуда были выгружены полигоны застройки. Табличное пересечение с открытыми данными многоквартирной жилой застройки Фонда развития территорий даёт полигональный слой с геопривязкой и следующими атрибутивными данными: год постройки, общая площадь, этажность. В свободной кроссплатформенной геоинформационной среде QGIS были выполнены расчеты тепловой нагрузки жилых многоквартирных зданий с записью в таблицу результатов.

В результате выполненного геокодирования данные были нанесены на картографическую основу и выполнено пространственное пересечение со слоем гексагональной сетки. Выполнены следующие расчеты: удельная тепловая нагрузка, показанная на рис. 9, удельная годовая потребность в теплоте, удельная энергоэффективность зданий, а также получено распределение систем теплоснабжения, представленное на рис. 10.

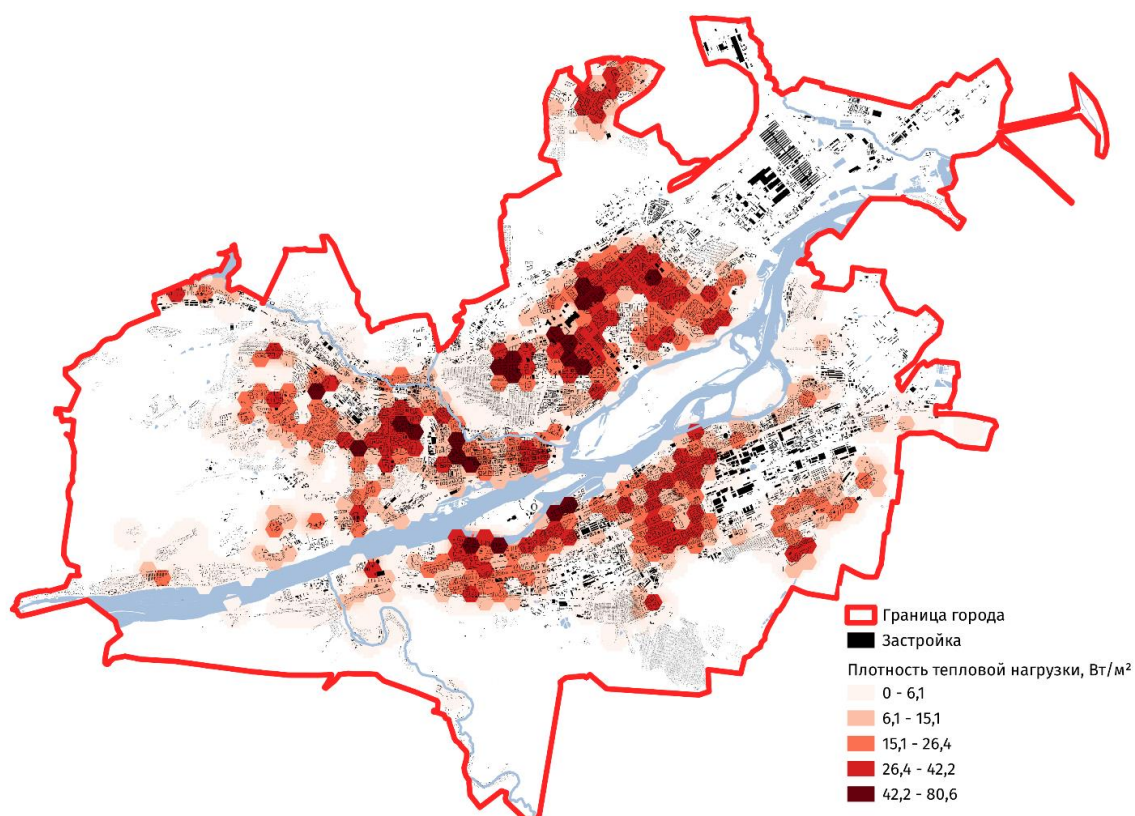


Рис. 9. Удельная тепловая нагрузка
Fig. 9. Specific heat load

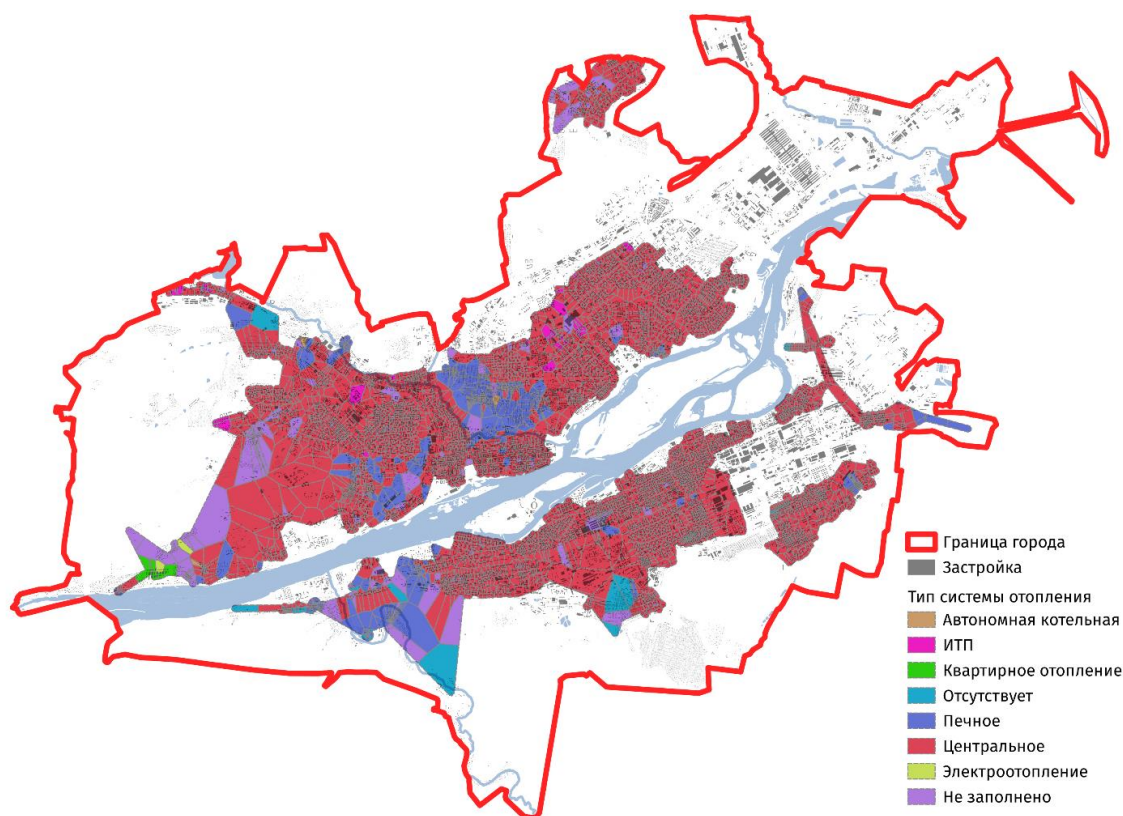


Рис. 10. Распределение систем теплоснабжения
Fig. 10. Distribution of heat supply systems

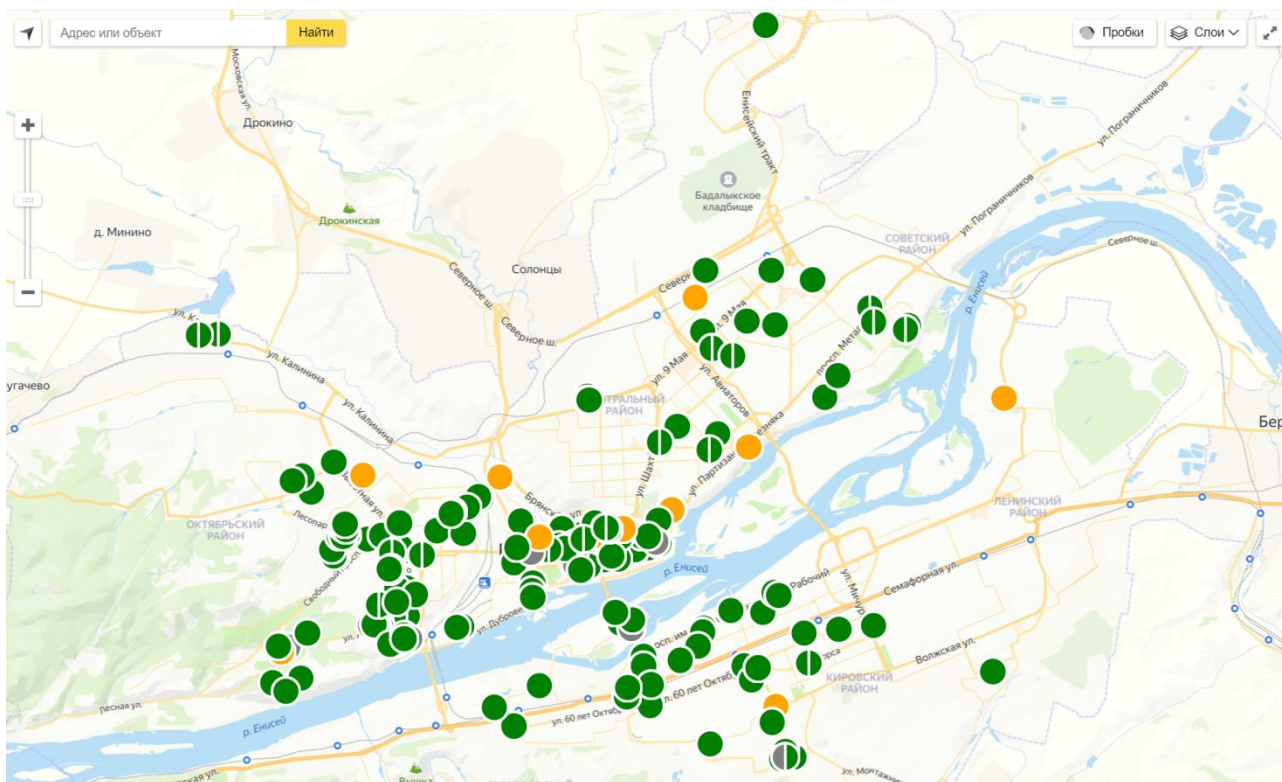


Рис. 11. Система мониторинга зданий
Fig. 11. Building monitoring system

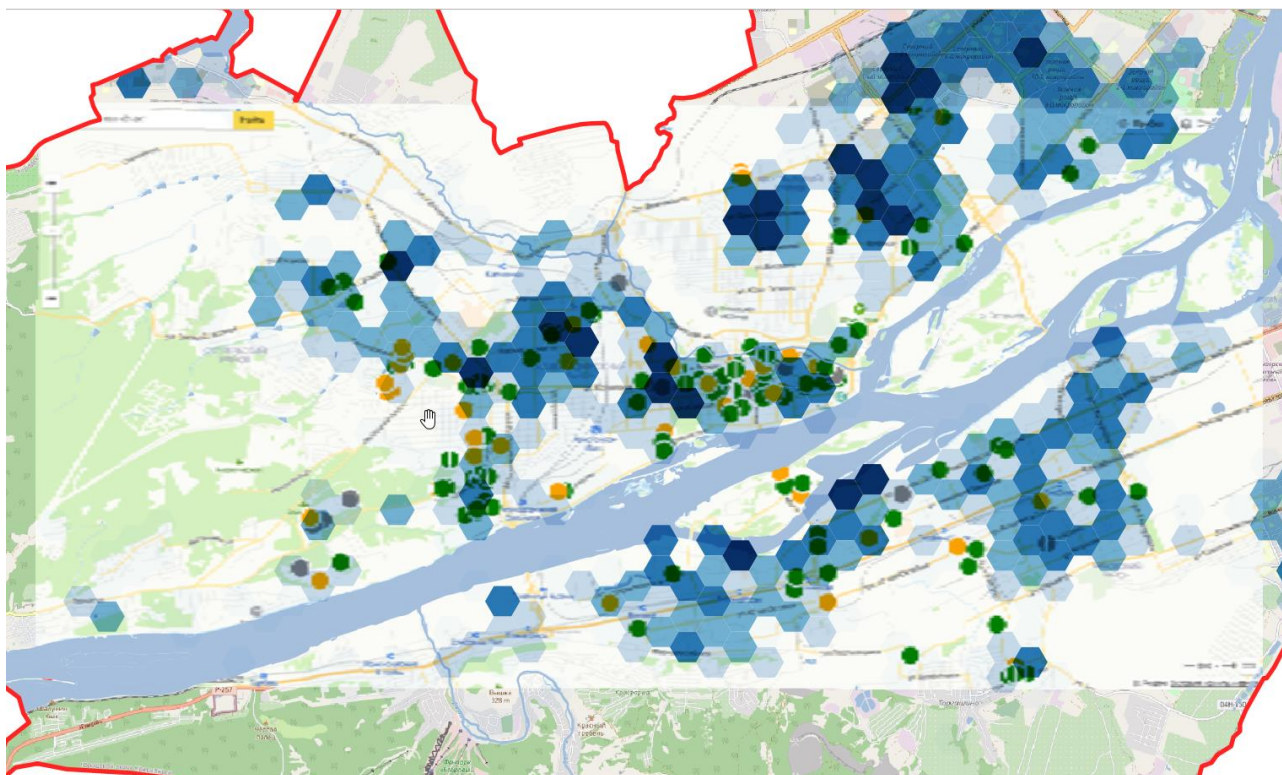


Рис. 12. Совмещение данных мониторинга с расчетными данными
Fig. 12. Combination of monitoring data with calculated data

Картосхемы распределения тепловой нагрузки и плотности тепловой нагрузки демонстрируют, что наибольшая удельная тепловая нагрузка приходится на новые жилые районы высотного домостроения.

В результате сопоставления данных о фактическом удельном и расчетном теплоснабжении и расчетном обнаружено, что потребители с наибольшим отклонением от нормативного теплоснабжения не входят в территории максимальной плотности тепловой нагрузки.

Дальнейший анализ необходимо вести с учетом топологии тепловых сетей.

Система мониторинга используется для значительного количества зданий, для которых рассчитывается показатель относительного удельного теплоснабжения с выводом на GIS-систему в реальном времени. На рис. 11 показано представление показателя относительного удельного теплоснабжения для зданий г. Красноярск. Зеленым отмечены здания, где показатель относительного удельного теплоснабжения не превышает порог низкой энергоэффективности, желтым – где превышает на данный момент.

Интеграция систем реального времени и геоинформационных систем позволяет получить реальный контекст для решения макроэкономических задач и создания более экологически рациональной

и надежной инфраструктуры. Показанное на рис. 12 совмещение данных мониторинга с расчетными данными позволяет оперативно принимать технически обоснованные и на данный период времени возможные, а также экономически целесообразные решения по актуализации Схемы теплоснабжения города.

Заключение

Энергоэффективность зданий остается сложной и не до конца изученной темой. Связанные с этим вопросы требуют постоянных усилий во многих областях исследования. Все классифицированные причины могут влиять на энергоэффективность здания, но зачастую сложно количественно оценить независимое влияние каждого воздействия из-за взаимной корреляции и вариабельности в каждом конкретном случае. Масштабные количественные многопараметрические анализы остаются немногочисленными и имеют значительные ограничения, что затрудняет вынесение окончательных суждений об оптимальных энергетических параметрах зданий. Среди стратегий, направленных на лучшее понимание способов повышения энергоэффективности, можно выделить углубленный мониторинг и анализ достаточно больших выборок зданий, что позволяет сделать выводы для значительной части современных зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Energy Agency, World Energy Outlook 2018. – 2018. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018> (дата обращения 16.10.2023).
2. Implementing the Energy Performance of Building Directive (EPBD) / G. Sutherland, P.G. Audi, A. Lacourt, A. Deliyannis, D. Sotiropoulos, K. Poseidon, P. McElmurray, M. Skrivanou, S. Koutsou, M.F. Davis, A. Fytro, M. Tsagkla // Intelligent Energy Europe Programme. – 2015. URL: www.epbd-ca.eu (дата обращения 16.10.2023).
3. Gram-Hanssen K., Georg S. Energy performance gaps: promises, people, practices // Building Research and Information. – 2017. – Vol. 46 (1). – P. 1–9.
4. Sunikka-Blank M., Galvin R. Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption // Building Research and Information. – 2012. – Vol. 40 (3). – P. 260–273.
5. Gerald M.S., Ghisi E. Building-level and Stock-level in contrast: a literature review of the energy performance of buildings during the operational stage // Energy and Buildings. – 2020. – Vol. 211. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109810> (дата обращения 16.10.2023).
6. Shove E. What is wrong with energy efficiency? // Building Research and Information. – 2017. – Vol. 46 (7). – P. 1–11.
7. Review of 10 years research on building energy performance gap: life-cycle and stakeholder perspectives / P.X.W. Zou, X. Xu, J. Sanjayan, J. Wang // Energy and Buildings. – 2018. – Vol. 178. – P. 165–181.
8. Guerra-Santin O., Tweed C.A. In-use monitoring of buildings: an overview of data collection methods // Energy Build. – 2015. – Vol. 93. – P. 189–207.
9. McElroy D.J., Rosenow J. Policy implications for the performance gap of low-carbon building technologies // Building Research and Information. – 2019. – Vol. 47. – P. 611–623.
10. Behavioral strategies to bridge the gap between potential and actual savings in buildings / M. Moezzi, C. Hammer, J. Goins, A. Meier // Natl. Res. Cent. Canada. – 2014. URL: <https://doi.org/10.13140/2.1.1979.2649> (дата обращения 16.10.2023).
11. Marchio D., Rabl A. Energy-efficient gas-heated housing in France: predicted and observed performance // Energy and Buildings. – 1991. – Vol. 17. – P. 131–139.
12. Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: a review / Y. Zhang, X. Bai, F.P. Mills, J.C.V. Pezzey // Energy and Buildings. – 2018. – Vol. 172. – P. 279–294.
13. Rui Liang, Wangfei Ding, Mohamed Amine Khadimallah. Buildings' internal heat gains prediction using artificial intelligence methods // Energy and Buildings. – 2021. – Vol. 258. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111794> (дата обращения 16.10.2023).
14. Lei Lei, Wei Chen, Wei Liu. A building energy consumption prediction model based on rough set theory and deep learning algorithms // Energy and Buildings. – 2021. – Vol. 240. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110886> (дата обращения 16.10.2023).

15. Finkenrath M., Faber T., Leiprecht S. Holistic modelling and optimization of thermal load forecasting, heat generation and plant dispatch for a district heating network // *Energy*. – 2022. – Vol. 250. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123666> (дата обращения 16.10.2023).
16. Shideh Shams Amiri, Maya Mueller, Simi Hoque. Investigating the application of a commercial and residential energy consumption prediction model for urban Planning scenarios with Machine Learning and Shapley Additive explanation methods // *Energy and Buildings*. – 2023. – Vol. 287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112965> (дата обращения 16.10.2023).
17. Yassine Himeur, Abdullah Alsalemi, Abbes Amira. Building power consumption datasets: Survey, taxonomy and future directions // *Energy and Buildings*. – 2020. – Vol. 227. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110404> (дата обращения 16.10.2023).
18. Sofiat O. Abioye, Lukumon O. Oyedele, Ashraf Ahmed. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 44. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299> (дата обращения 16.10.2023).
19. Cozza S., Chambers J., Patel M.K. In search of optimal consumption: a review of causes and solutions to the Energy Performance Gap in residential buildings // *Energy and Buildings*. – 2021. – Vol. 249. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111253> (дата обращения 16.10.2023).
20. Dahlström L., Broström T., Widén J. Advancing urban building energy modelling through new model components and applications: a review // *Energy and Buildings*. – 2022. – Vol. 266. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112099> (дата обращения 16.10.2023).
21. González-Domínguez J., Sánchez-Barroso G., De Sousa Neves N. Cox proportional hazards model used for predictive analysis of the energy consumption of healthcare buildings // *Energy and Buildings*. – 2022. – Vol. 257. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111784> (дата обращения 16.10.2023).
22. Borrelli Bart M., Hilde Breesch M. Evaluation and optimization of the performance of the heating system in a nZEB educational building by monitoring and simulation // *Energy and Buildings*. – 2021. – Vol. 231. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110616> (дата обращения 16.10.2023).
23. Haichao Zheng, Ge Gao, Lihua Zhao. Monitoring and diagnostics of buildings' heat loss based on 3D IR model of multiple buildings // *Energy and Buildings*. – 2022. – Vol. 259. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111889> (дата обращения 16.10.2023).
24. Аверьянов В.К., Горшков А.С., Васильев Г.П. Повышение эффективности централизованного теплоснабжения существующего жилого фонда // *Вестник гражданских инженеров*. – 2018. – № 6 (71). – С. 99–111.
25. Колосов М.В., Липовка Ю.Л. Использование компьютерного мониторинга энергоэффективности теплоснабжения зданий // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2021. – № 1 (129). – С. 30–38.
26. Белиловец В.И., Липовка Ю.Л. Проектирование подземных бесканальных, предварительно термически напряженных, теплопроводов со стартовыми компенсаторами // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 57–69.
27. Липовка Ю.Л. Математическое моделирование систем теплоснабжения с обеспечением устойчивого энергосбережения // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2002. – № 1. – С. 89–92.
28. Липовка Ю.Л., Калабин Д.А. Гидравлическая устойчивость в условиях неравномерной автоматизации систем теплоснабжения // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2018. – № 3 (113). – С. 19–24.
29. Ali Mohammad U., Shamsi H., O'Donnell J. Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis // *Energy and Buildings*. – 2021. – Vol. 246. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111889> (дата обращения 16.10.2023).
30. González-Torres M., Pérez-Lombard L., Bertoldi P. Activity and efficiency trends for the residential sector across countries // *Energy and Buildings*. – 2022. – Vol. 273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112428> (дата обращения 16.10.2023).
31. Данилов Г.К., Еделев А.В. Разработка геоинформационной системы для исследования живучести систем энергетики // *Системы анализа и обработки данных*. – 2022. – № 1 (85). – С. 41–58.
32. Максименко Е.В., Щербаненко К.А. прототип базы геоданных и 3D-модель общежития РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг*. – 2017. – Т. 2. – № 2. – С. 66–76.
33. Mutani G., Delmastro Ch., Corngati S.P. Characterization of building thermal energy consumption at the urban scale // *Energy Procedia*. – 2016. – Vol. 101 – P. 384–391.
34. Evola G., Fichera A., Palermo V. Application of a mapping tool to plan energy saving at a neighborhood scale // *Energy Procedia*. – 2016. – Vol. 101 – P. 137–144.
35. Ali Mohammad U., Shamsi H., O'Donnell J. A data-driven approach for multi-scale GIS-based building energy modeling for analysis, planning and support decision making // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 279. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115834> (дата обращения 16.10.2023).
36. Lumbreras M., Diarce G., Larrinaga P. Design of district heating networks in built environments using GIS: a case study in Vitoria-Gasteiz, Spain // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 349. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131491> (дата обращения 16.10.2023).
37. Li X., Walch A., Chambers J. Optimal spatial resource allocation in networks: Application to district heating and cooling // *Computers & Industrial Engineering*. – 2022. – Vol. 171. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108448> (дата обращения 16.10.2023).
38. Стенников В.А., Добровольская Т.В. Методы регрессионного анализа в исследованиях теплоснабжения в России // *Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова*. – 2018. – № 2 (98). – С. 142–153.

Информация об авторах

Михаил Викторович Колосов, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики Политехнического института Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79; MKolosov@sfu-kras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4884-4889>

Алексей Юрьевич Липовка, кандидат технических наук, доцент кафедры градостроительства Института архитектуры и дизайна Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79; ALipovka@sfu-kras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9840-8511>

Юрий Львович Липовка, доктор технических наук, профессор кафедры инженерных систем зданий и сооружений Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79; YLipovka@sfu-kras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5065-676X>

Поступила в редакцию: 17.10.2023

Поступила после рецензирования: 09.11.2023

Принята к публикации: 14.06.2024

REFERENCES

1. *International Energy Agency, World Energy Outlook 2018*, 2018. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018> (accesses 16 October 2023).
2. Sutherland G., Audi P.G., Lacourt A., Deliyannis A., Sotiropoulos D., Poseidon K., McElmurray P., Skrivanou M., Koutsou S., Davis M.F., Fytro A., Tsagkla M. Implementing the Energy Performance of Building Directive (EPBD). *Intelligent Energy Europe Programme*. 2015. Available at: www.epbd-ca.eu (accesses 16 October 2023).
3. Gram-Hanssen K., Georg S. Energy performance gaps: promises, people, practices. *Building Research and Information*, 2017, vol. 46 (1), pp. 1–9. DOI: 10.1080/09613218.2017.1356127.
4. Sunikka-Blank M., Galvin R. *Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption*, 2012, pp. 260–273. DOI: 10.1080/09613218.2012.690952.
5. Gerald M.S., Ghisi E. Building-level and Stock-level in contrast: a literature review of the energy performance of buildings during the operational stage. *Energy Build*, 2020. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2020.109810.
6. Shove E. What is wrong with energy efficiency? *Building Research & Information*, 2018, vol. 46, pp. 779–789. DOI: 10.1080/09613218.2017.1361746.
7. Zou P.X.W., Xu X., Sanjayan J., Wang J. Review of 10 years of research on building energy performance gap: life-cycle and stakeholder perspectives. *Energy Build*, 2018, vol. 178, pp. 165–181. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.08.040.
8. Guerra-Santin O., Tweed C.A. Tweed In-use monitoring of buildings: an overview of data collection methods. *Energy Build*, 2015, vol. 93, pp. 189–207. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.02.042.
9. McElroy D.J., Rosenow J. Policy implications for the performance gap of low-carbon building technologies. *Res. Inf.*, 2019, vol. 47, pp. 611–623. DOI: 10.1080/09613218.2018.1469285.
10. Moezzi M., Hammer C., Goins J., Meier A. Behavioral strategies to bridge the gap between potential and actual savings in buildings. *Natl. Res. Cent. Canada*, 2014. DOI: 10.1289/ehp.1002503.
11. Marchio D., Rabl A. Energy-efficient gas-heated housing in France: predicted and observed performance. *Energy Build*, 1991, vol. 17, pp. 131–139. DOI: 10.1016/0378-7788(91)90005-N.
12. Zhang Y., Bai X., Mills F.P., Pezzey J.C.V. Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: a review. *Energy Build*, 2018, vol. 172, pp. 279–294. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.05.017.
13. Rui Liang, Wangfei Ding, Mohamed Amine. Khadimallah Buildings' internal heat gains prediction using artificial intelligence methods. *Energy and Buildings*, 2022, vol. 258, Article 111794. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111794.
14. Lei Lei, Wei Chen, Wei Liu. A building energy consumption prediction model based on rough set theory and deep learning algorithms. *Energy and Buildings*, 2021, vol. 240, Article 110886. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110886.
15. Finkenrath M., Faber T., Leiprecht S. Holistic modeling and optimization of thermal load forecasting, heat generation and plant dispatch for a district heating network. *Energy*, 2022, vol. 250, Article 123666. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123666.
16. Shideh Shams Amiri, Maya Mueller, Simi Hoque. Investigating the application of a commercial and residential energy consumption prediction model for urban Planning scenarios with Machine Learning and Shapley Additive explanation methods. *Energy and Buildings*, 2023, vol. 287, Article 112965. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.112965.
17. Yassine Himeur, Abdullah Alsalemi, Abbes Amira. Building power consumption datasets: Survey, taxonomy and future directions. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 227, Article 110404. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110404.
18. Sofiat O. Abioye, Lukumon O. Oyedele, Ashraf Ahmed. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 44, Article 103299. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103299.
19. Cozza S., Chambers J., Patel M.K. In search of optimal consumption: a review of causes and solutions to the Energy Performance Gap in residential buildings. *Energy and Buildings*, 2021, vol. 249, Article 111253. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111253.
20. Dahlström L., Broström T., Widén J. Advancing urban building energy modeling through new model components and applications: a review. *Energy and Buildings*, 2022, vol. 266, Article 112099. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112099.
21. González-Domínguez J., Sánchez-Barroso G., De Sousa Neves N. Cox proportional hazards model used for predictive analysis of the energy consumption of healthcare buildings. *Energy and Buildings*, 2021, vol. 257, Article 111784. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111784.

22. Borrelli M., Merema B., Breesch H. Evaluation and optimization of the performance of the heating system in a nZEB educational building by monitoring and simulation. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 231, Article 110616. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110616.
23. Haichao Zheng, Ge Gao, Lihua Zhao. Monitoring and diagnostics of buildings' heat loss based on 3D IR model of multiple buildings. *Energy and Buildings*, 2022, vol. 259, Article 111889. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.111889
24. Averyanov V.K., Gorshkov A.S., Vasilyev G.P. Increasing the efficiency of centralized heat supply of existing housing stock. *Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 6 (71), pp. 99–111. (In Russ.)
25. Kolosov M.V., Lipovka Yu.L. Using computer monitoring of energy efficiency of heat consumption in buildings. *Energy saving and water treatment*, 2021, no. 1 (129), pp. 30–38. (In Russ.)
26. Belilovets V.I., Lipovka Yu.L. Design of underground ductless, thermally pre-stressed heat pipelines with starting compensators. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 57–69. (In Russ.)
27. Lipovka Yu.L. Mathematical modeling of heat supply systems ensuring sustainable energy saving. *Energy saving and water treatment*, 2002, no. 1, pp. 89–92. (In Russ.)
28. Lipovka Yu.L., Kalabin D.A. Hydraulic stability in conditions of uneven automation of heat supply systems. *Energy saving and water treatment*, 2018, no. 3 (113), pp. 19–24. (In Russ.)
29. Ali Mohammad U., Shamsi H., O'Donnell J. Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis. *Energy and Buildings*, 2021, vol. 246, Article 111073. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111073.
30. González-Torres M., Pérez-Lombard L., Bertoldi P. Activity and efficiency trends for the residential sector across countries. *Energy and Buildings*, 2022, vol. 273, Article 112428. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112428.
31. Danilov G.K., Edelev A.V. Development of a geographic information system for studying the survivability of energy systems. *Systems for analysis and data processing*, 2022, no. 1 (85), pp. 41–58. (In Russ.)
32. Maksimenko E.V., Shcherbanenko K.A. A prototype of a geodatabase and a 3D model of the dormitory of the RSAU-MSHA named after K.A. Timiryazeva. *Ecology. Economy. Computer science. Series: Geoinformation technologies and space monitoring*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 66–76. (In Russ.)
33. Mutani G., Delmastro Ch., Corngati S.P. Characterization of Building Thermal Energy Consumption at the Urban Scale. *Energy Procedia*, 2016, vol. 101, pp. 384–391, DOI: 10.1016/j.egypro.2016.11.049.
34. Evola G., Fichera A., Palermo V. Application of a Mapping tool to Plan Energy Saving at a Neighborhood Scale. *Energy Procedia*, 2016, vol. 101, pp. 137–144. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.11.018.
35. Ali Mohammad U., Shamsi H., O'Donnell J. A data-driven approach for multi-scale GIS-based building energy modeling for analysis, planning and support decision making. *Applied Energy*, 2020, vol. 279, Article 115834. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115834.
36. Lumbreras M., Diarce G., Larrinaga P. Design of district heating networks in built environments using GIS: A case study in Vitoria-Gasteiz, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 349, Article 131491. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131491.
37. Li X., Walch A., Chambers J. Optimal spatial resource allocation in networks: Application to district heating and cooling. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, vol. 171, Article 108448. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108448.
38. Stennikov V.A., Dobrovolskaya T.V. Methods of regression analysis in studies of heat consumption in Russia. *Bulletin of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov*, 2018, no. 2 (98), pp. 142–153. (In Russ.)

Information about the authors

Mikhail V. Kolosov, Cand. Sc., Associate Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; MKolosov@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4884-4889>

Alexey Yu. Lipovka, Cand. Sc., Associate Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ALipovka@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9840-8511>

Yuri L. Lipovka, Dr. Sc., Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; YLipovka@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5065-676X>

Received: 17.10.2023

Revised: 09.11.2023

Accepted: 14.06.2024