

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69:504(985)

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1031-1046

Критерии выбора технологий экологически безопасного строительства в Арктике

Александр Алексеевич Кузьменков¹, Александр Вячеславович Кайчёнов²¹ *Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ); г. Петрозаводск, Россия;*² *Мурманский арктический университет (МАУ); г. Мурманск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Обоснована актуальность создания и совершенствования цифровых инструментов для комплексных научных исследований и опытно-конструкторских работ на основе информационной модели строительного объекта на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ). Исследование фокусируется на экологически безопасном (зеленом) строительстве в северных и арктических регионах (САР). Цель исследования — обоснование набора критериев «зеленого» строительства в САР Российской Федерации на основе логически взаимосвязанных моделей: проектной модели, натурной модели, математических моделей и цифровой модели-двойника. К основным критериям отнесены энергоэффективность и экологическая безопасность зданий.

Материалы и методы. Объектами исследования являются два здания-близнеца, спроектированные и построенные по программе научных исследований в Республике Карелия и Мурманской области. Объекты одинаковы, но условия их функционирования различаются. Предложена методология комплексного научного исследования для каждой стадии ЖЦ объектов. Применены методы сравнительного анализа и метод экспертных оценок, а также методы, представленные в нормативно-технических документах системы технического регулирования РФ, относящиеся к технологическим аспектам строительства.

Результаты. Определены четыре группы базовых критериев строительства для САР РФ: внешняя среда, внутренняя среда, материалы и технологии, энергоэффективность. Разработана информационная модель исследования (Research Information Model — RIM) как инструмент комплексного научного изучения в области технологий строительства в САР. Рассмотрена практическая реализация результатов исследования на двух указанных выше объектах, включая цифровой мониторинг состояния объектов в течение двух лет (2021–2023 гг.). Определены перспективы продолжения исследований.

Выводы. Обоснована необходимость разработки и на примере двух построенных объектов подтверждена целесообразность использования разработанной информационной модели исследования. Опыт применения основных блоков модели и цифрового мониторинга состояния объектов в течение двух лет подтвердил целесообразность использования информационного моделирования и продолжения исследований для совершенствования технологий строительства в САР.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационная модель исследования, технологии информационного моделирования, цифровизация строительства, методология научного исследования, «зеленое» строительство, северные и арктические территории, критерии оценки, системы сертификации, технологии экологически безопасного строительства, жизненный цикл зданий

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кузьменков А.А., Кайчёнов А.В. Критерии выбора технологий экологически безопасного строительства в Арктике // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 1031–1046. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1031-1046

Автор, ответственный за переписку: Александр Алексеевич Кузьменков, akka1977@bk.ru.

Environmentally friendly construction technologies selection criteria in the Arctic

Alexander A. Kuzmenkov¹, Alexander V. Kaychenov²¹ *Petrozavodsk State University (PetrSU); Petrozavodsk, Russian Federation;*² *Murmansk Arctic University (MAU); Murmansk, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The paper substantiates the relevance of creating and improving digital tools for complex scientific research and development work based on the information model of a construction object at all stages of the life cycle. The research focuses on environmentally safe (green) construction in the northern and Arctic regions. The purpose of the study is to substantiate a set of criteria for “green” for the northern and Arctic regions of the Russian Federation on the basis of logically interrelated models: a design model, a full-scale model, mathematical models and a digital twin model. The main criteria include energy efficiency and environmental safety of buildings.

Materials and methods. The objects of the study are two twin buildings designed and built according to the programme of scientific research in the Republic of Karelia and the Murmansk region. The objects are identical, but the conditions of their functioning are different. The methodology of complex scientific research for each stage of the life cycle of objects is proposed. The methods of comparative analysis and the method of expert assessments were used, as well as the methods presented in the normative and technical documents of the technical regulation system of the Russian Federation related to the technological aspects of construction.

Results. Four groups of basic construction criteria for the northern and Arctic regions of the Russian Federation are defined: external environment; internal environment; materials and technologies; energy efficiency. The Research Information Model (RIM) was developed as a tool for comprehensive scientific research in the field of construction technologies in the northern and Arctic regions. The practical implementation of the results of the study at the two above-mentioned facilities, including digital monitoring of the condition of the facilities for two years (2021–2023), is considered. Prospects for the continuation of the research are determined.

Conclusions. The necessity of the development is justified and the expediency of using the developed information model of research is confirmed by the example of two constructed objects. The experience of using the main blocks of the model and digital monitoring of the condition of objects for two years has confirmed the expediency of using information modelling and continuing research to improve construction technologies in the northern and Arctic regions.

KEYWORDS: Research Information Model (RIM), information modelling technologies, digitalization of construction, methodology of scientific research, green construction, green technologies, northern and Arctic territories, evaluation criteria, certification systems, environmentally safe construction technologies, life cycle of buildings

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 075-03-2023-128).

FOR CITATION: Kuzmenkov A.A., Kaychenov A.V. Environmentally friendly construction technologies selection criteria in the Arctic. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):1031-1046. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1031-1046 (rus.).

Corresponding author: Alexander A. Kuzmenkov, akka1977@bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Энергоэффективные и экологически безопасные («зеленые») технологии получили широкое развитие в последние годы как в мире, так и в Российской Федерации [1–4]. Использование экологических безопасных технологий на арктических и субарктических территориях особенно важно для обеспечения их устойчивого развития [5–8]. Экологические, экономические и социальные аспекты развития Арктики наиболее чувствительны к глобальному изменению климата и техногенным воздействиям [3, 4, 9, 10]. Ряд проблем связан с тем, что развитие «зеленого» строительства на арктических территориях имеет объективные ограничения из-за суровых климатических условий, особых экосистем, неразвитой транспортно-логистической структуры и т.д. [11, 12]. Однако, несмотря на довольно широкое развитие «зеленого» строительства на арктических территориях в соответствии с «зелеными» стандартами, было сертифицировано небольшое количество зданий [13, 14]. Небольшое количество сертифицированных «зеленых» зданий в Арктике указывает на недостаточный учет условий арктических и субарктических территорий в существующих системах оценки и сертификации «зеленого» строительства.

Также бурным развитием в строительной отрасли России в настоящее время характеризуются сферы цифровизации строительства [15–19] и внедрения технологий информационного моделирования [20–24] на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) зданий и сооружений. Несмотря на растущее число научных публикаций по обозначенной теме, проблема совершенствования технологий строительства в северных регионах требует продолжения исследований.

Актуальность настоящей статьи обуславливается необходимостью создания и использования в научных исследованиях комплексного инструмента с применением современных методов цифровизации и технологий информационного моделирования применительно к зданиям и сооружениям на всех этапах их ЖЦ.

Цель исследования — формирование набора критериев для «зеленого» строительства в северных регионах и последующая оценка эффективности использования этих критериев в течение ЖЦ «зеленых» зданий в Республике Карелия и Мурманской области на основе ряда моделей: проектной, натурной (физической), математической модели и цифровой модели-двойника. Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- анализ критериев действующих «зеленых» стандартов (зарубежных и российских) с учетом оценки их применимости к зданиям на северных и арктических территориях;
- оценка разработанного набора критериев для «зеленых» зданий на основе набора моделей на разных этапах ЖЦ двух идентичных «зеленых» зданий, построенных в разных регионах АЗРФ.

Современное состояние обозначенной выше научной проблемы отражено в ряде работ, которые имеют прямое отношение к теме данного прикладного исследования. Вопросы развития экологически безопасного («зеленого») строительства и применения «зеленых» технологий в целях реализации принципов устойчивого развития исследованы в работах В.И. Теличенко, А.А. Бенужа, А.А. Лапидуса, М.Ю. Слесарева [25–28]. Вопросы цифровизации процессов реализации инвестиционно-строительных проектов представлены в работе

М.Ю. Викторова [29]. В исследовании А.Н. Ларионова и А.А. Карачевой цифровизация рассматривается как инновационный фактор снижения сроков и повышения качества строительства [30]. А.Н. Ларионов, В.В. Соловьев, А.А. Морозов исследовали вопрос формирования модели капитальных затрат в реалиях цифровизации строительства [31]. Вопросы разработки структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий изучали В.А. Волкодав, И.А. Волкодав [32]. Новые возможности применения технологий информационного моделирования в строительстве и их использования на различных этапах ЖЦ зданий различного назначения приведены в публикациях Е.А. Гусаковой, А.В. Приходько, А.Н. Овчинниковой и А.Н. Ларионова [33–35]. Проблемы и перспективы внедрения технологии информационного моделирования в области строительства исследованы в трудах [36–38].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Регионы (территории) реализации исследований

В качестве территорий для реализации комплексного исследования были выбраны два региона РФ — Республика Карелия и Мурманская область.

В составе территории Республики Карелия представлены территории, как приравненные к районам Крайнего Севера, так и территории, находящиеся в районах Крайнего Севера. К территориям Крайнего Севера относятся Беломорский, Калевальский, Лоухский, Кемский районы и Костомукшский городской округ, которые входят в Арктическую зону РФ. Мурманская область полностью входит в Арктическую зону РФ и относится к территориям Крайнего Севера.

Выполнение исследовательских задач осуществлялось в Мурманске, Мурманской области и в Петрозаводске, Республике Карелия, в следующих климатических условиях:

- Петрозаводск расположен на 61°50'33" северной широты, 34°22'52" восточной долготы. Климат характеризуется как умеренно-континентальный с морскими чертами: среднегодовая температура составляет +3,8 °С; ежегодно выпадает около 756 мм осадков;
- Мурманск расположен на 68°57'13,4" северной широты, 33°03'30,3" восточной долготы. Климат близок к умеренно холодному: среднегодовая температура составляет –0,4 °С; ежегодно выпадает около 601 мм осадков.

Табл. 1. Климатические параметры рассматриваемых территорий (в соответствии с СП 131.13330.2012 «Строительная климатология») [39]

Table 1. Climatic parameters of the territories under consideration (in accordance with CP 131.13330.2012 “Building climatology”) [39]

Климатические параметры Climate parameters	Рассматриваемые территории Considered territories	
	Мурманская область, г. Мурманск Murmansk region, the city of Murmansk	Республика Карелия, г. Петрозаводск Republic of Karelia, city of Petrozavodsk
Высота над уровнем моря, м Height above sea level, m	13	26
Географические координаты Geographical coordinates	68°58'45.1"N, 33°5'33"E	61°47'5.6"N, 34°20'48.8"E
Температура воздуха в самый холодный пятидневный период, °С, с обеспеченностью 0,92 Air temperature of the coldest five-day period, °C, with security 0.92	–30	–28
Абсолютная минимальная температура воздуха, °С Absolute minimum air temperature, °C	–39	–43
Продолжительность, дни и средняя температура воздуха, °С, периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 8 °С Duration, days, and average air temperature, °C, of the period with average daily air temperature ≤ 8 °C	275 –3,4	235 –3,2
Среднемесячная относительная влажность воздуха в самый холодный месяц, % Average monthly relative humidity of the coldest month, %	84	86
Количество осадков за ноябрь–март, мм Rainfall for November–March, mm	138	169
Средняя скорость ветра, м/с, за период со среднесуточной температурой воздуха ≤ 8 °С Average wind speed, m/ s, for a period with an average daily air temperature of ≤ 8 °C	4,9	3,2
Среднегодовая температура, °С Average annual temperature, °C	0,3	2,8

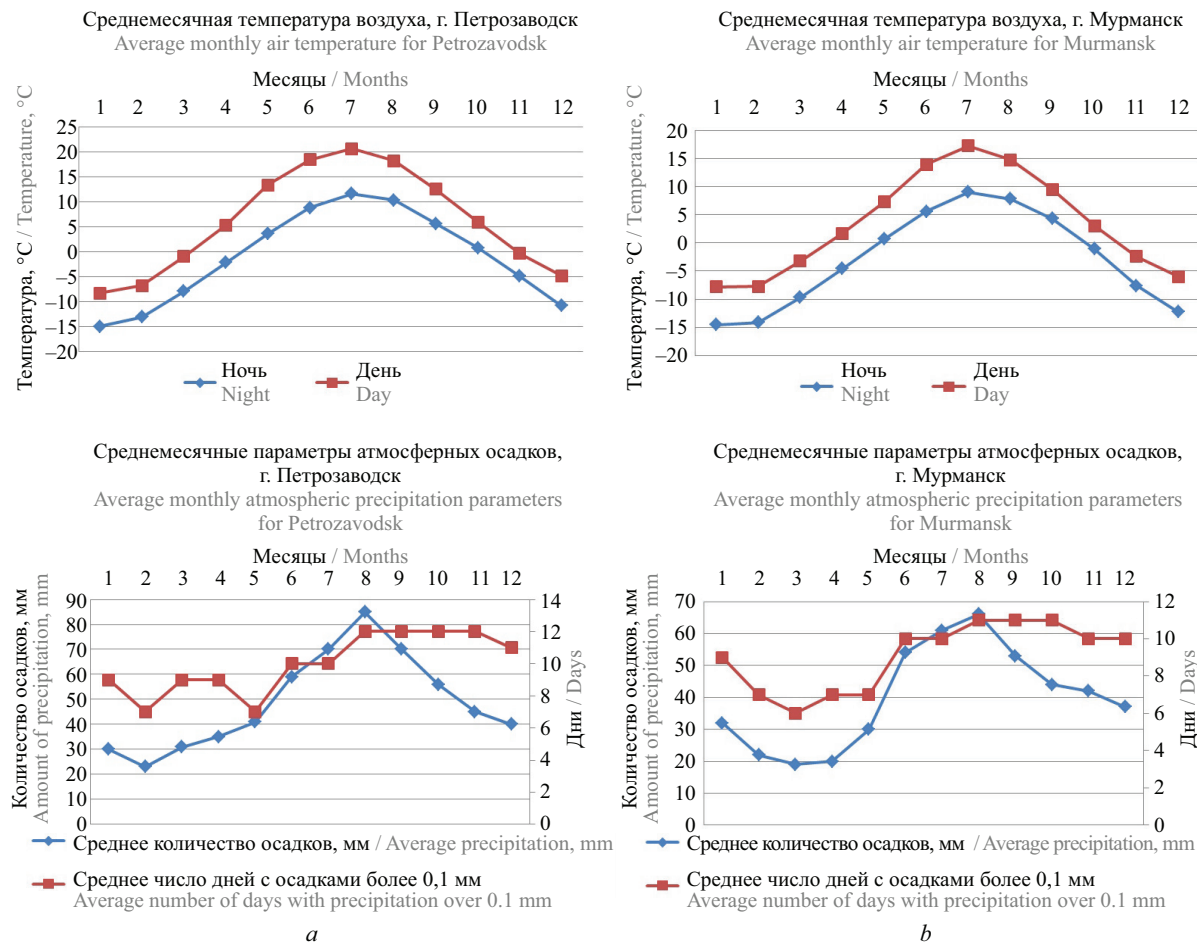


Рис. 1. Среднемесячные климатические данные для Петрозаводска (а) и Мурманска (б) по данным Центра гидрометеорологических исследований РФ

Fig. 1. Average monthly climate data for Petrozavodsk (a) and Murmansk (b) according to the Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation

Сравнение природных и климатических условий в соответствии с СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» представлено в табл. 1. На рис. 1 показаны среднемесячные климатические данные [39].

Методология комплексного исследования

Комплексное исследование представлено следующими этапами:

- разработка (выбор) критериев оценки «зеленого» строительства на северных и арктических территориях РФ на основе анализа систем сертификации «зеленого» строительства;
- оценка разработанных критериев на основе проектных, физических, математических моделей и цифровых двойных моделей, отражающих ЖЦ здания: проектирование, строительство, эксплуатация, снос и утилизация.

Концептуальная методологическая схема комплексного исследования представлена на рис. 2.

Циклический подход к оценке критериев предусматривает использование механизма обратной связи на нескольких уровнях:

- использование механизма экспертной оценки на этапе определения набора критериев для арктических зеленых зданий;
- тестирование системы критериев, основанной на наборе моделей, на соответствие целям, для которых они разработаны (мониторинг, измерение, верификация и тестирование) на уровне каждой модели.

Для анализа критериев систем «зеленой» сертификации были выбраны стандарты и системы, которые хорошо известны и имеют наиболее широкое применение в России [14]: две международные системы экологической сертификации — LEED v.3 (Лидерство в энергетическом и экологическом проектировании, США) и BREEAM New Construction 2016 (Метод экологической оценки строительных исследований, Великобритания) и две российские системы — СТО НОСТРОЙ 2.35.4–2011 («Зеленое строительство». Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания, Россия) и GREENZOOM 2014 (Система практических рекомендаций по повышению энерго-

эффективности, водоотдачи и экологичности гражданских зданий, Россия).

Предполагается, что анализ и оценка разработанного набора критериев будут проводиться последовательно в рамках различных моделей в соответствии со схемой на рис. 2.

Проектная модель представляет собой проектные решения экспериментального зеленого здания для северных и арктических территорий [40]. Для разработки проектной модели «зеленого» здания используется набор критериев, отобранных и дополнительно разработанных с учетом результатов исследования. Экспериментальное проектирование, строительство и эксплуатация предполагают возведение двух полностью идентичных зеленых

зданий, отвечающих разработанным критериям для зеленого строительства в Арктике, расположенных в двух северных регионах России.

Натурные (физические) модели двух экспериментальных зданий в Мурманске и Петрозаводске созданы с учетом разработанных проектных решений и сформированного набора критериев для зеленого строительства. Изучение натурных моделей позволит сравнить результаты теоретической и экспериментальной оценки критериев.

Математическая модель экспериментальных зданий реализована на основе данных анализа проектных и натурных моделей зданий, а также результатов полевых исследований на основе модельных зданий. Математическая модель — это численное

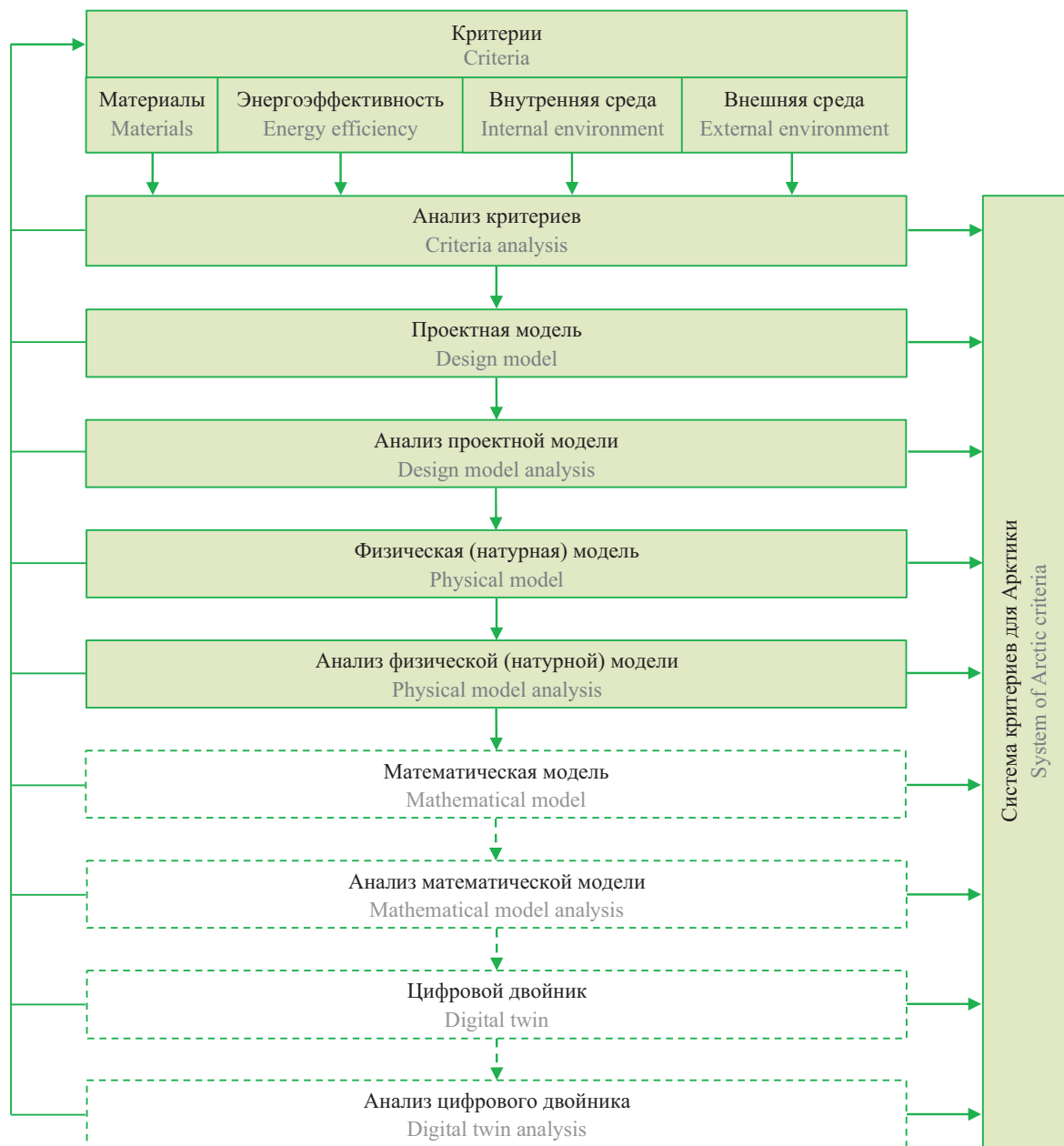


Рис. 2. Концептуальная методологическая схема комплексного исследования

Fig. 2. Conceptual methodological scheme of complex research

(имитационное) представление процессов, происходящих с физическими объектами (модельными зданиями). Математические модели позволят более широко изучить процессы, происходящие с физическими моделями в реальных условиях их эксплуатации, а также исследовать те процессы, которые не могут быть представлены в физических моделях из-за существующих ограничений экспериментальных зданий.

Цифровые двойники (ЦД) экспериментальных (модельных) зданий формируются по принципам, аналогичным построению информационных моделей зданий (BIM-моделей). Ключевое отличие заключается в том, что набор метаданных для элементов трехмерной модели здания формируется за счет данных, полученных в результате научных исследований и анализа полученных результатов. В качестве базовой модели принимается BIM-модель экспериментального здания. Когда базовая модель насыщается данными, полученными в результате анализа математической модели, можно получить ЦД изделий (экспериментальных зданий), включающие результаты математического моделирования процессов, происходящих с модельными объектами. Создание системы ЦД (зданий в Мурманске и Петрозаводске) даст возможность проводить вычислительные эксперименты (вариантное моделирование) и прогнозировать режимы и состояния модельных объектов для оценки соответствия разработанным критериям зеленого строительства в Арктике.

Методы исследования

На первом этапе комплексного исследования проводится отбор и анализ критериев «зеленого» строительства для северных и арктических территорий. Для определения набора критериев рассматриваются критерии вышеупомянутых систем сертификации экологически чистого строительства. В каждом из этих стандартов представлены пять укрупненных групп критериев (далее именуемых базовыми группами): внешняя среда, внутренняя среда, энергоэффективность, материалы и эффективность использования воды [14]. Определяется вес (значимость) выбранных групп в каждой рассматриваемой системе сертификации. Дальнейшее рассмотрение предусматривает анализ отдельных групп критериев. Анализ и применимость критериев и их групп были проведены с учетом действующей российской нормативной базы.

При анализе значимости критериев применительно к условиям Арктики использованы методы сравнительного анализа и сопоставления, а также метод экспертных оценок. В экспертной оценке принимает участие группа экспертов, имеющих соответствующий опыт работы в исследуемой области на северных и арктических территориях. Оценка основана на сравнении рассматриваемых критериев с факторами, влияющими на экологичность здания в Арктике. На основе результатов анализа в группах

предложен набор критериев для оценки проектных решений и существующих зданий в Арктике [14].

Второй этап комплексного исследования включает проверку предложенных критериев и их компонентов. Проверка критериев заключается в их мониторинге в различных условиях, в учете их взаимного влияния, а также в уточнении значимости критерия для экологической оценки зданий на арктических территориях. Верификация и анализ критериев осуществляются на базе набора моделей — проектной, натурной, математической и цифровой в модели в виде ЦД [41].

Разработка проектной модели (проектных решений) экспериментального здания выполняется с помощью методов вариантного проектирования и сравнения. Проектные решения экспериментальных зданий предусматривают использование материалов и технологий, наиболее соответствующих принципам «зеленого» строительства [42–45]. Разработка проектных решений проводится на основе нормативной базы РФ и с учетом условий рассматриваемых территорий. Анализ проектной модели осуществляется путем обоснования проектных решений, принятых с учетом концепции «зеленого строительства» [40].

Физические натурные модели позволяют проводить большое количество разнообразных исследований для проверки разработанных критериев «зеленого» строительства в Арктике. Исследования выполняются в реальных условиях эксплуатации модульных зданий и позволяют сравнить результаты для двух северных территорий России. Одним из примеров комплекса исследований, основанных на натуральных моделях, является оценка теплофизических свойств ограждающих конструкций зданий [39, 46, 47]. Натурные объекты необходимы, однако их создание требует больших ресурсов. Поэтому, чтобы расширить возможности прикладных исследований, используются, как отмечено выше (рис. 2), математические модели.

Для проведения экспериментальных исследований, основанных на физических моделях, применяются методы, изложенные в нормативных документах РФ. При рассмотрении теплофизических свойств ограждающих конструкций зданий используются следующие нормативные методы исследования:

- метод тепловизионного обследования экспериментальных зданий. Методика обследования предусмотрена ГОСТ Р 54852–2011 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций». Целью тепловизионного исследования является контроль качества теплозащиты многослойных конструкций зданий в натуральных условиях, выявление мест с пониженными теплозащитными свойствами, а также сравнение данных по двум объектам в разных регионах;
- метод измерения плотности тепловых потоков через ограждающие конструкции в реальных

условиях эксплуатации зданий. Способ измерения плотности тепловых потоков описан в ГОСТ 25380–2014 «Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции». Измерение тепловых потоков через ограждающие конструкции позволяет получить данные о фактических тепловых потоках в конкретных выбранных точках исследуемых конструкций, сравнить их с расчетными данными и оценить фактические тепловые потери;

- метод определения фактических теплофизических свойств строительных материалов в соответствии с ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Для проведения этого исследования в процессе строительства были собраны образцы конструкционных и теплоизоляционных материалов. Методика предусматривает проведение лабораторных испытаний образцов в стационарном режиме теплового потока. Фактические теплофизические характеристики материалов необходимы для уточнения проектных решений и дальнейшего построения теоретических моделей тепловых полей ограждающих конструкций и пространственного моделирования распределения тепловых потоков экспериментального здания;

- метод определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в полевых условиях. Методика определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций изложена в ГОСТ 31167–2009 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натурных условиях». Этот метод позволит оценить обобщенные характеристики воздухопроницаемости ограждений экспериментальных зданий. Одновременные исследования воздухопроницаемости и тепловизионной съемки дадут возможность получить более подробные результаты оценки ограждающих конструкций.

Для уточнения данных исследований в реальных условиях эксплуатации, наряду с нормативными методами, используется экспериментальная методика. Экспериментальная методика основана на разработанной системе мониторинга параметров внутреннего микроклимата, окружающей среды и строительных конструкций [48]. Основными параметрами, контролируемыми системой мониторинга, являются температура и влажность [49], а также объем потребления электроэнергии в процессе эксплуатации зданий [50]. При строительстве экспериментальных зданий в слоях конструкций устанавливается система датчиков [48]. На этапе разработки проектной модели было определено 25 измерительных узлов на ключевых участках строительных конструкций: утепленная кровля и нижнее перекрытие, стены на разной высоте, места расположения различных типов теплоизоляционных материа-

лов, а также углы здания и стены вблизи оконных проемов. Датчики расположены в измерительном узле на каждом слое многослойной конструкции. В зданиях установлена система счетчиков для учета потребления электроэнергии. Потребление электроэнергии контролируется отдельно для каждой инженерной системы здания (отопление, освещение, вентиляция) и для каждой отдельной части здания (каркас и бревно). Реализована удаленная передача данных для их записи в режиме реального времени [51].

Модельный объект (экспериментальное здание) — это многосвязный объект с распределенными параметрами. Исследование таких объектов предлагается проводить на основе математических моделей двумя классами методов: с использованием численного моделирования и с помощью идентификации параметров [52]. В соответствии с методами, отраженными в ГОСТ Р 57188–2016 «Численное моделирование физических процессов. Термины и определения» и ГОСТ Р 57700.1–2017 «Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования», численное моделирование проводится с применением уравнений в частных производных. Объекты, аналитическое описание которых связано с большим количеством факторов, которые трудно учесть, исследуются с использованием идентификации параметров модели.

Модельный объект позволяет создавать комплекс математических моделей, полученных как с помощью численного моделирования, так и с идентификацией параметров. Проверка адекватности и корректности математических моделей моделируемому объекту (валидация и верификация в соответствии с методологией ГОСТ Р 57188–2016) проводится в соответствии с требованиями ASME V & V 20–2009 «Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer» («Стандарт для верификации и валидации в области вычислительной гидродинамики и теплопередачи»), ASME V & V 10–2006 «Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics Revision PINS» («Руководство по верификации и валидации версии PINS вычислительной механики твердого тела») и ASME V & V 10.1–2012 «An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics» («Иллюстрация концепций верификации и валидации в вычислительной механике твердого тела»).

Наряду с математическим моделированием процессов в модельном объекте осуществляется компьютерное моделирование: функциональное, структурное, геометрическое, физико-механическое, физико-химическое, технико-экономическое, технологическое (рис. 2). Для описания динамических процессов, происходящих в модельном объ-

екте, в основном используются математические модели моделирования процессов в соответствии с ГОСТ Р 57412–2017 «Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения».

На основе измеренных значений параметров микроклимата и потребления электроэнергии, полученных от модельного объекта, а также созданных математических моделей разрабатывается программное обеспечение для компьютерного моделирования, которое проходит валидацию (проверку на соответствие математической модели в соответствии с ГОСТ Р 57700.24–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис») и верификацию (проверку на соответствие реальному миру в соответствии с ГОСТ Р 57700.25–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации»).

Система математических и компьютерных моделей позволит создать цифровую модель изделия (модельного объекта) после оценки соответствия требованиям, предъявляемым к изделию согласно ГОСТ 16504–81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Общие термины и определения».

Сочетание двухсторонних информационных связей с изделием (система мониторинга модельного объекта) и цифровой моделью продукта позволит получить цифровой двойник (ЦД) изделия (ЦД модельного объекта) [53] в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам анализа критериев наиболее распространенных систем стандартов «зеленого» строительства определены четыре основные группы критериев «зеленого» строительства для Арктики: внешняя среда, внутренняя среда, материалы и энергоэффективность.



а

На основе сформированных критериев «зеленого» строительства для северных и арктических территорий была разработана проектная модель. Проведен анализ проектной модели на соответствие принятых проектных решений набору критериев указанных выше базовых групп.

Согласно разработанной проектной модели реализована физическая (полномасштабная) модель в виде построенных «зеленых» зданий-близнецов на двух северных территориях РФ (рис. 3). Разработаны программы исследования физических (натурных) моделей для оценки соответствия индивидуальным критериям, включенным в основные группы. Анализ физической модели и подтверждение ее характеристик, свойств, состояний и параметров критериев проводится с использованием экспериментальной методики. Суть методики заключается в непрерывном измерении и накоплении данных о температуре, влажности, потребляемой электроэнергии и количестве углекислого газа в воздухе на основе автоматизированной системы мониторинга.

Анализ результатов проектирования и физической модели выявил ограничения их комплексной оценки на соответствие разработанным критериям зеленого строительства в Арктике. Модельные (экспериментальные) здания представляют собой сложные и многосвязные системы, характеризующиеся наличием большого количества взаимовлияющих внешних и внутренних факторов, что требует применения нового комплексного исследовательского инструмента. В качестве комплексного инструмента авторы предлагают использовать исследовательскую информационную модель (рис. 4), которая включает, помимо проектных и физических моделей, методы математического моделирования и технологию ЦД [42].

Информационная модель исследования (Research Information Model — RIM) представлена в виде «серого ящика». Входными параметрами RIM являются критерии в области «зеленого» строительства, системы сертификации, законы, нормативные акты, знания, а также существующие про-



б

Рис. 3. Экспериментальные здания (модельные объекты) в Петрозаводске (а) и в Мурманске (б)

Fig. 3. Experimental buildings (model objects) in Petrozavodsk (a) and Murmansk (b)

блемы. Для функционирования RIM необходимо применять методологию, концепции, парадигмы, исследования мирового уровня и исследовательские программы. Результаты RIM представляют собой систему критериев для арктической зоны, теорию, знания, а также возможные пути решения проблемы. На этапе исследования корректируются входные параметры RIM.

Внутри «серого ящика» показаны взаимосвязи между моделями, описанными ранее в исследовании: проектной моделью и физической моделью, основанной на ней, математическими моделями и цифровыми аналогами.

Цветные стрелки на рис. 4 показывают информационные потоки между моделями. Информационный поток 1 «Данные проектной BIM-модели для строительства» характеризует информацию, передаваемую для создания физических моделей на основании проектной модели (проектной документации в виде информационной модели здания — BIM). В то же время данные о фактическом исполнении проектных решений в натуре (информационный поток 2 «Данные зданий для коррекции данных BIM-модели») могут быть отражены в модели проекта в виде корректировки. Из физической модели (модельные здания) экспери-

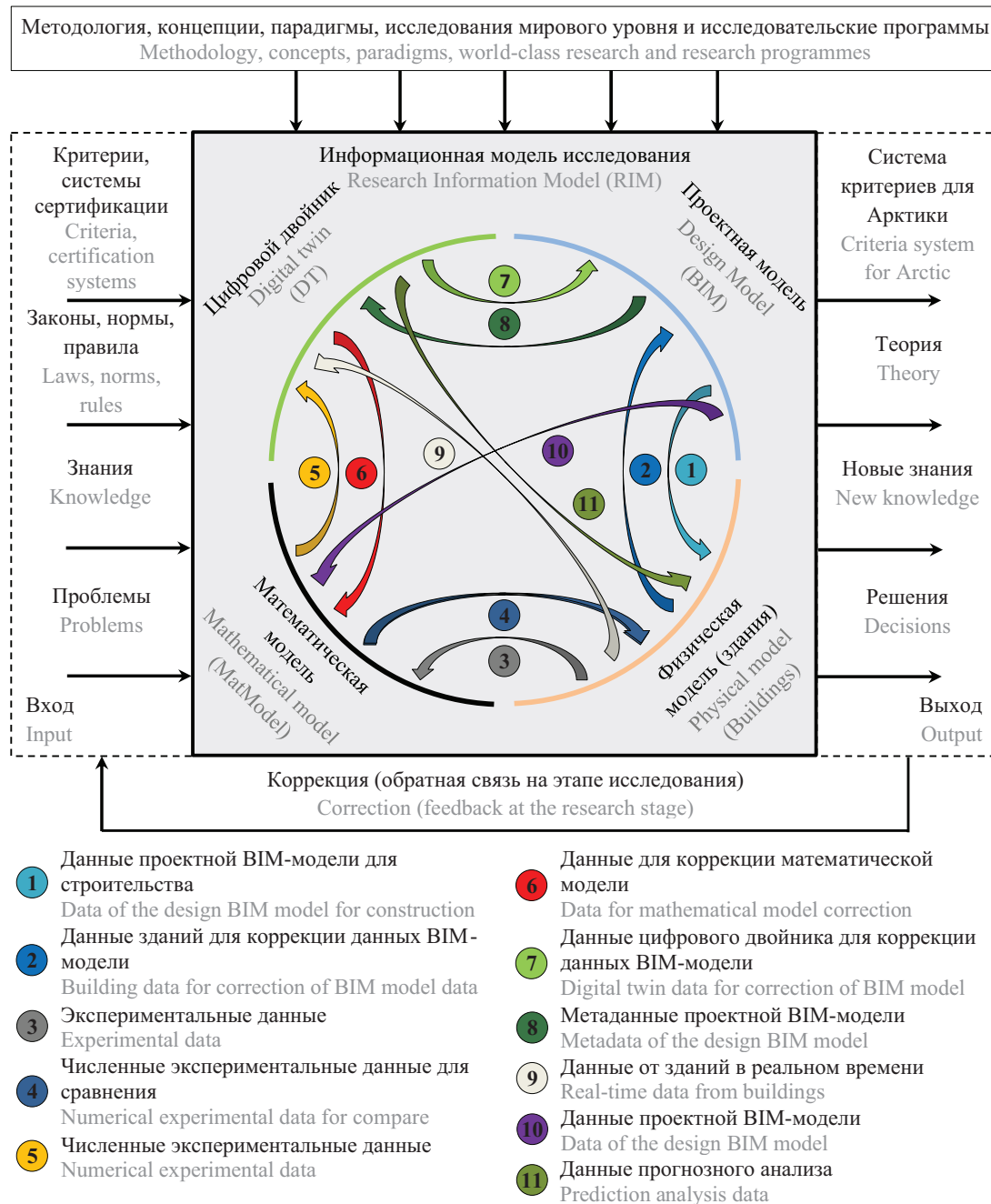


Рис. 4. Информационная модель исследования (RIM)

Fig. 4. Research Information Model (RIM)

ментальные данные (информационный поток 3 «Экспериментальные данные»), а также данные из проектной модели (информационный поток 10 «Данные проектной BIM-модели») поступают в математическую модель, которая представляет собой набор математических моделей процессов, происходящих в модельных (экспериментальных) зданиях. Использование математического моделирования дает возможность дополнить объект результатами численного моделирования режимов, состояний и ситуаций, которые физическая модель не позволяет реализовать из-за структурных, энергетических и других ограничений.

Для проверки и валидации математической модели значения результатов численного моделирования сравниваются со значениями из реальных экспериментальных данных (информационный поток 4 «Численные экспериментальные данные для сравнения»). Информация, полученная в результате математического моделирования, вводится в модель ЦД (информационный поток 5 «Численные экспериментальные данные»). Цифровой двойник представляет собой набор BIM-моделей (информационный поток 8 «Метаданные проектной BIM-модели»), построенных на основе данных проектной модели, результатов численного моделирования (информационный поток 5 «Численные экспериментальные данные») и данных реального времени, поступающих из физической модели (информационный поток 9 «Данные от зданий в реальном времени»).

Цифровой двойник позволяет выполнять: прогнозную аналитику массива сведений и передачу их в физическую модель для сравнения (информационный поток 11 «Данные прогнозного анализа»), коррекцию математических моделей процессов (информационный поток 6 «Данные для коррекции математической модели»), коррекцию проектной модели (информационный поток 7 «Данные цифрового двойника для коррекции данных BIM-модели») для получения пилотного проекта (типового проекта повторного применения) с наилучшими характеристиками для северных и арктических территорий.

Экспериментальное исследование физической модели с использованием математического моделирования и объединение ее с ЦД даст возможность получить комплексный инструмент, позволяющий учитывать большее количество взаимовлияющих факторов в процессах создания моделей зданий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По первичным результатам комплексного исследования в сфере экологически безопасного (зеленого) строительства в северных и арктических регионах и обоснования необходимости создания инструмента для проведения комплексных научных исследований и опытно-конструкторских работ на основе информационной модели строительного

объекта на всех этапах его ЖЦ можно сделать следующие выводы.

Обоснована актуальность и определена цель комплексного исследования, которая заключается в обосновании и формировании набора критериев «зеленого» строительства и их последующей оценке в течение ЖЦ зданий в арктических и субарктических регионах РФ на основе ряда логически взаимосвязанных моделей: проектной модели, натурной (физической) модели, математических моделей и цифровой модели-двойника. Сформулированы задачи комплексного исследования: анализ критериев действующих «зеленых» стандартов (зарубежных и российских) с учетом оценки их применимости к зданиям на северных и арктических территориях; оценка разработанного набора критериев на основе набора моделей на разных этапах ЖЦ зданий в регионах АЗРФ. Определены регионы для проведения исследования — Республика Карелия и Мурманская область.

Выделены этапы комплексного исследования, а также набор моделей, используемых на этапах исследования. Разработана методология комплексного научного исследования в области «зеленого» строительства в Арктике (рис. 2). Для каждого этапа определены методы научного исследования и используемая модель. На первом этапе комплексного исследования (отбор и анализ критериев «зеленого» строительства для северных и арктических территорий) применены методы сравнительного анализа и сопоставления, а также метод экспертной оценки, который применяется при анализе значимости критериев применительно к условиям Арктики. На втором этапе комплексного исследования (проверка (верификация и анализ) предложенных критериев на основе набора моделей — проектных, натуральных, математических и моделей ЦД изделий и технологических процессов)) применены методы, представленные в НТД технического регулирования РФ.

По результатам анализа критериев наиболее распространенных систем стандартов «зеленого» строительства установлены четыре базовые группы критериев зеленого строительства для АЗРФ: внешняя среда, внутренняя среда, материалы и энергоэффективность. На основе сформированных критериев разработана проектная модель экспериментального здания. Проведен анализ проектной модели на соответствие принятых проектных решений набору критериев указанных выше базовых групп. Согласно разработанной проектной модели реализована физическая полномасштабная модель в виде построенных зданий-близнецов в Республике Карелия и Мурманской области (рис. 3). Разработаны программы исследований моделей для оценки соответствия базовым критериям.

Разработана информационная модель исследования (Research Information Model — RIM) (рис. 4) как методологический инструмент комплексного научного исследования в области «зеленого» строи-

тельства в Арктике. Использование исследовательской информационной модели позволит проводить комплексные исследования: сбор, анализ данных, прогнозирование возможных изменений технологических параметров при изменении режимов работы объектов, а также внешних случайных воздействий в процессе эксплуатации. При реализации комплексного исследования на основе исследовательской информационной модели (RIM) модельные объекты становятся полноценными цифровыми (виртуальными) полигонами для тестирования критериев зеленого строительства в арктической зоне, в том числе в рамках учебного процесса при подготовке специалистов по направлению «Строительство» и смежным основным профессиональным образовательным программам.

Апробация результатов представленного исследования в рамках научных конференций показала

адекватность предложенного подхода к реализации комплексных прикладных исследований [14, 39, 41, 43, 45–50]. На базе экспериментальных зданий (модельных объектов) в г. Петрозаводске и г. Мурманске (рис. 3) с 2021 г. по настоящий момент в реальном времени ведется мониторинг и накопление данных системы мониторинга температуры и влажности окружающей среды, внутреннего микроклимата зданий и состояния ограждающих конструкций. Однако в связи с тем, что модельные (экспериментальные) здания с системами мониторинга представляют собой сложные и многосвязные системы, характеризующиеся наличием большого количества взаимовлияющих внешних и внутренних факторов, отдельные этапы и положения требуют проведения дальнейших исследований, что обозначено на концептуальной методологической схеме комплексного исследования (рис. 2) пунктирными линиями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бенуж А.А., Колчигин М.А. Анализ концепции «зеленого» строительства как механизма по обеспечению экологической безопасности строительной деятельности // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 161–165. EDN PJOUSN.

2. Теличенко В.И., Бенуж А.А. Обзор и классификация рейтинговых систем сертификации зданий и сооружений // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 31–1 (50). С. 239–243. EDN RDPBRB.

3. Теличенко В.И., Слесарев М.Ю. «Зеленая» стандартизация будущего — фактор экологической безопасности среды жизнедеятельности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 90–97. EDN XWBDZJ.

4. Теличенко В.И., Слесарев М.Ю. «Зеленая» стандартизация технологий формирования природоподобной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 5 (116). С. 558–567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567

5. Васильева Ж.В., Буряченко С.Ю. Базовые принципы концепции «зеленого строительства» // Известия высших учебных заведений. Арктический регион. 2018. № 1. С. 12–15. EDN VWFTQA.

6. Никифорова В.А., Каверзина Л.А., Нужина И.П. «Зеленое» строительство как эффективный инструмент устойчивого развития территорий // Проблемы социально-экономического развития Сибири. 2020. № 1 (39). С. 44–50. DOI: 10.18324/2224-1833-2020-1-44-50. EDN DTKCNS.

7. Ротарь А.М. «Зеленое» строительство как эффективный инструмент устойчивого развития территорий // Путеводитель предпринимателя. 2022.

Т. 15. № 2. С. 63–68. DOI: 10.24182/2073-9885-2022-15-2-63-68

8. Томаков В.И., Томаков М.В. Зеленое строительство в концепции устойчивого развития российских городов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21. № 2 (71). С. 16–31. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-2-16-31. EDN YTPVFP.

9. Ravasio L., Riise R., Sveen S.E. Green Buildings in the Arctic region: a literature review // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 172. P. 16002. DOI: 10.1051/e3sconf/202017216002

10. Теличенко В.И., Щербина Е.В. Социально-природно-техногенная система устойчивой среды жизнедеятельности // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 5–12. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.5-12. EDN KUKAGX.

11. Gutman S., Teslya A. Environmental safety as an element of single-industry towns' sustainable development in the Arctic region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 180. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/180/1/012010

12. Voronina E. Development of the Arctic regions of the Russian Federation: Drivers of greening // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 10051. DOI: 10.1051/e3sconf/202124410051

13. Ravasio L., Sveen S.E., Riise R. Green building in the Arctic region: State-of-the-art and future research opportunities // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 22. P. 9325. DOI: 10.3390/su12229325

14. Buryachenko S.Yu., Kuzmenkov A.A., Karachentseva I.M., Voronin Z.A., Popova O.M. Green building in the northern and Arctic regions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

2021. Vol. 937. Issue 4. P. 042030. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042030

15. Кисель Т.Н., Прохорова Ю.С. Уровень цифровизации российских предприятий инвестиционно-строительной сферы // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 971–987. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.971-987. EDN MGOJFC.

16. Липидус А.А. Организационно-технологическая платформа строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 4. С. 516–524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX.

17. Гусакова Е.А., Овчинников А.Н. Перспективы моделирования жизненного цикла объекта капитального строительства информационными потоками // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 8. С. 1191–1200. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1191-1200. EDN BBAAAZ.

18. Липидус А.А., Шевченко И.С. Основные принципы формирования организационно-технологической платформы научно-технического сопровождения уникальных объектов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 7. С. 1138–1147. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1138-1147. EDN LRPIZJ.

19. Липидус А.А., Мотылев Р.В., Сокольников В.В. Формирование методологии детерминированной модели организации строительного производства на основе концепции организационно-технологической платформы строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 1. С. 116–131. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.116-131. EDN IDDMFY.

20. Сафина Г.Л., Еришов Д.С., Корнев А.С., Хайруллин Р.З. Моделирование процессов создания высокотехнологичной продукции строительного назначения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 5. С. 785–797. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.785-797. EDN CECEAJ.

21. Ларионов А.Н., Приходько А.В. Развитие внедрения технологий информационного моделирования при реализации жилищных инвестиционно-строительных проектов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 2. С. 270–282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282. EDN ZVIYHH.

22. Дмитриев А.Н., Владимирова И.Л. Технологии информационного моделирования в управлении строительными проектами России // Промышленное и гражданское строительство. 2019. №. 10. С. 48–59. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.10.48-59. EDN FXXZAA.

23. Бурова О.А., Божик А.С., Шевцов А.В. Применение BIM технологий в строительстве: отечественный и мировой опыт // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. 2020. № 2. С. 84–90. EDN HYOTET.

24. Чурбанов А.Е., Шамара Ю.А. Влияние технологии информационного моделирования на развитие инвестиционно-строительного процесса // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 824–835. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.824-835. EDN XUWKPR.

25. Теличенко В.И. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности: понятия, термины, стандарты // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 4 (103). С. 364–372. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.364-372. EDN YNCVQX.

26. Теличенко В.И., Бенуж А.А., Сухина Е.А. Межгосударственные «зеленые» стандарты для формирования экологически безопасной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 4. С. 438–462. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.438-462. EDN EXLUMH.

27. Теличенко В.И., Липидус А.А., Слесарев М.Ю. Анализ и синтез образов экологически ориентированных инновационных технологий строительного производства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 8. С. 1298–1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDACL.

28. Виктор М.Ю. Цифровизация процессов реализации инвестиционно-строительных проектов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 4 (35). С. 516–523. DOI: 10.21285/2227-2917-2020-4-516-523. EDN MLLUEV.

29. Ларионов А.Н., Карачева А.А. Цифровизация как инновационный фактор снижения сроков и повышения качества жилищного строительства в Московской области // Журнал исследований по управлению. 2020. № 6. С. 30–57. EDN RPKJT.

30. Ларионов А.Н., Соловьев В.В., Морозов А.А. Формирование модели капитальных затрат в реалиях цифровизации строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 1. С. 91–101. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.91-101. EDN OWNGYT.

31. Волкова В.А., Волкова И.А. Разработка структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 6. С. 867–906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906. EDN RGQGTG.

32. Гусакова Е.А. Информационное моделирование жизненного цикла проектов высотного строительства // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 1 (112). С. 14–22. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.14-22. EDN YNHJXW.

33. Ларионов А.Н., Приходько А.В. Развитие внедрения технологий информационного моделирования при реализации жилищных инвестиционно-строительных проектов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 2. С. 270–282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282. EDN ZVIYHH.

34. Гусакова Е.А., Овчинников А.Н. Перспективы моделирования жизненного цикла объекта капитального строительства информационными потоками // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 8. С. 1191–1200. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1191-1200. EDN BBAAAZ.

35. Уткина В.Н., Грязнов С.Ю., Бабушкина Д.Р. Проблемы и перспективы внедрения технологий информационного моделирования в об-

ласти строительства в России: проблемы и перспективы внедрения // Основы экономики, управления и права. 2019. № 1 (19). С. 57–61. DOI: 10.51608/23058641_2019_1_57. EDN YPHGPG.

36. Болотова А.С., Маршавина Я.И. Проблемы внедрения технологии информационного моделирования в России // Строительное производство. 2021. № 2. С. 70–80. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_70. EDN PEYWAQ.

37. Ларионов А.Н., Приходько А.В. Оценка перспектив использования технологий информационного моделирования в жилищном строительстве в России на период до 2030 года // Экономика строительства. 2022. № 9. С. 67–78. EDN DBQGIL.

38. Buryachenko S., Voronin Z., Karachentseva I., Kuzmenkov A., Popova O. Factors influencing the rating of low-rise wooden houses as “green” buildings // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 05018. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305018

39. Кузьменков А.А., Караченцева Я.М., Дербенёв А.В. Обоснование конструктивных и технологических решений экспериментального деревянного малоэтажного здания с учетом принципов «Зеленого строительства» // Resources and Technology. 2021. Т. 18. № 1. С. 66–93. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5522. EDN VTLGWT.

40. Kuzmenkov A., Kaychenov A., Karachentseva I., Vasileva Z., Buryachenko S., Voronin Z. Information model of green building research in the Arctic: methodological aspects // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 420. P. 03021. DOI: 10.1051/e3sconf/202342003021

41. Kuzmenkov A., Kolesnikov G., Voronin Z. Green Technologies of Wooden Building for Arctic // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 385–398. DOI: 10.1007/978-3-030-94770-5_30

42. Buryachenko S.Yu., Karachentseva I.M., Voronin Z.A., Kuzmenkov A.A. The influence of enclosing structures of walls on the energy efficiency of a wooden building (on the example of the international project KO 1089 “Green Arctic Building”) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 539. Issue 1. P. 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012024

43. Kuzmenkov A., Tikhonov E., Kolesnikov G. Thermal bridges in wall panels of wooden frame houses // Proceedings of ECEE 2019. 2020. Pp. 329–336. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_29

44. Karachentseva I., Kuzmenkov A., Kaychenov A., Voronin Z. Energy-efficient building materials for Arctic conditions as a criterion for “green building” //

E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 383. P. 04075. DOI: 10.1051/e3sconf/202338304075

45. Buryachenko S., Voronin Z., Karachentseva I., Kuzmenkov A., Popova O. Monitoring of thermophysical properties of wooden buildings envelopes in climatic conditions of Murmansk and Petrozavodsk // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 05025. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405025

46. Kuzmenkov A., Karachentseva I. Refinement of thermal engineering calculations results taking into account actual materials characteristics // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 402. P. 07001. DOI: 10.1051/e3sconf/202340207001

47. Kuzmenkov A.A., Kuvshinov D.A., Buryachenko S.Yu., Kaychenov A.V., Karachentseva I.M., Voronin Z.A. Monitoring system for temperature and relative humidity of the experimental building // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2131. Issue 5. P. 052070. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052070

48. Kuzmenkov A., Buryachenko S., Kuvshinov D., Karachentseva I., Popova O., Voronin Z. et al. Humidity Regime of a Double Wooden Wall Made of Rounded Logs // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Pp. 1276–1284. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_142

49. Kaychenov A., Lukin S., Yarotskaya A., Selyakov I., Ereschenko V., Kuzmenkov A. Automated systems for monitoring microclimate parameters and electricity metering of an experimental building // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 389. P. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202338902005

50. Кайчёнов А.В., Лукин С.А., Яроцкая А.А. Разработка системы автоматизированного мониторинга параметров микроклимата и автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии модельного объекта // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2022. Т. 25. № 4. С. 298–304. DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-4-298-304. EDN ICJLSN.

51. Stolyanov A., Zhuk A., Vlasov A., Maslov A., Kuranova L., Kaychenov A. Complex for modeling and optimization the sterilization process // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 403. Issue 1. P. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012016

52. Кайченев А.В., Благовещенский И.Г. Комплексная модернизация систем управления процессами тепловой обработки водных биоресурсов Арктики с использованием интеллектуальных технологий : монография. Курск, 2022. 251 с. EDN QCTQSF.

Поступила в редакцию 8 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 7 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 7 марта 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Алексеевич Кузьменков — кандидат экономических наук, доцент кафедры технологии и организации строительства; Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ); 185910,

Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33; SPIN-код: 2863-5238, РИНЦ ID: 359459, Scopus: 57220389900, ORCID: 0000-0001-6365-4421; akka1977@bk.ru;

Александр Вячеславович Кайчёнов — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики и вычислительной техники; **Мурманский арктический университет (МАУ)**; 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13; SPIN-код: 7342-6350, РИНЦ ID: 544546, Scopus: 57210912615, ORCID: 0000-0002-0358-8888; kc_05@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Benuzh A.A., Kolchigin M.A. Analysis of the Concept of “Green” Construction as a Vehicle to Ensure the Environmental Safety of Construction Activities. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 12:161-165. EDN PJOUNS. (rus.).
2. Telichenko V.I., Benuzh A.A. Review and classification of rating systems for building certification. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013; 31-1(50):239-243. EDN RDPBRB. (rus.).
3. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. Green standardization of the future is a factor of ecological safety of the life environment. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 8:90-97. EDN XWBDZJ. (rus.).
4. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. “Green” standardization of technologies for forming the nature-friendly living environment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(5):(116):558-567. DOI: 10.22227/1997-0935. 2018.5.558-567 (rus.).
5. Vasil'yeva ZH. V., Buryachenko S.Yu. Basic principles of the “green building” concept. Proceedings of higher educational institutions. *The Arctic region*. 2018; 1:12-15. EDN VWFTQA. (rus.).
6. Nikiforova V.A., Kaverzina L.A., Nuzhina I.P. “Green” construction as an effective tool of sustainable development of territories. *Issues of Social-Economic Development of Siberia*. 2020; 1(39):44-50. DOI: 10.18324/2224-1833-2020-1-44-50. EDN DTKCNS. (rus.).
7. Rotar A.M. “Green” construction as an effective tool for sustainable development of territories. *Entrepreneur's Guide*. 2022; 15(2):63-68. DOI: 10.24182/2073-9885-2022-15-2-63-68 (rus.).
8. Tomakov V.I., Tomakov M.V. Green building in the concept of sustainable development of Russian cities. *Proceedings of the Southwest State University*. 2017; 21(2):(71):16-31. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-2-16-31. EDN YTPVFP. (rus.).
9. Ravasio L., Riise R., Sveen S.E. Green Buildings in the Arctic region : a literature review. *E3S Web of Conferences*. 2020; 172:16002. DOI: 10.1051/e3sconf/202017216002
10. Telichenko V.I., Shcherbina E.V. Social-natural-technogenic system of sustainable environment of vital activity. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 6:5-12. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.5-12. EDN KUKAGX. (rus.).
11. Gutman S., Teslya A. Environmental safety as an element of single-industry towns’ sustainable development in the Arctic region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 180:012010. DOI: 10.1088/1755-1315/180/1/012010
12. Voronina E. Development of the Arctic regions of the Russian Federation: Drivers of greening. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:10051. DOI: 10.1051/e3sconf/202124410051
13. Ravasio L., Sveen S.E., Riise R. Green building in the Arctic region: State-of-the-art and future research opportunities. *Sustainability*. 2020; 12(22):9325. DOI: 10.3390/su12229325
14. Buryachenko S.Yu., Kuzmenkov A.A., Karachentseva I.M., Voronin Z.A., Popova O.M. Green building in the northern and Arctic regions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 937(4):042030. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042030
15. Kisel T.N., Prokhorova Yu.S. The level of digitalization of Russian enterprises in the investment and construction sector. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):971-987. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.971-987. EDN MGOJFC. (rus.).
16. Lapidus A.A. Organizational and technological platform of construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(4):516-524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX. (rus.).
17. Gusakova E.A., Ovchinnikov A.N. Prospects for the life cycle modeling of a capital construction facility using information flows. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1191-1200. DOI: 10.22227/1997-0935. 2020.8.1191-1200. EDN BBAAAZ. (rus.).
18. Lapidus A.A., Shevchenko I.S. Main principles of the formation of organizational and technological platform for scientific and technical support of unique objects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1138-1147. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1138-1147. EDN LRPIZJ. (rus.).

19. Lapidus A.A., Motylev R.V., Sokolnikov V.V. Development of a methodology underlying a deterministic model of construction work arrangements on the basis of the concept of an organizational and technological platform for construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(1):116-131. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.116-131. EDN IDDMFY. (rus.).
20. Safina G.L., Ershov D.S., Kornev A.S., Khayrullin R.Z. Modelling of processes of creation of hi-tech construction products. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):785-797. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.785-797. EDN CECEAJ. (rus.).
21. Larionov A.N., Prikhodko A.V. Further introduction of information modelling technologies in the course of implementation of investment projects in the field of housing construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):270-282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282. EDN ZVIYHH. (rus.).
22. Dmitriyev A.N., Vladimirova I.L. BIM Technologies in Building Construction Projects Management in Russia. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 10:48-59. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.10.48-59. EDN FXXZAA. (rus.).
23. Burova O.A., Bozhik A.S., Shevtsov A.V. Application of BIO technologies in construction: domestic and international experience. *Bulletin of the MFUA*. 2020; 2:84-90. EDN HYOTET. (rus.).
24. Churbanov A.E., Shamara Yu.A. The impact of information modelling technology on the development of investment-construction process. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(7):(118):824-835. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.824-835. EDN XUWKPR. (rus.).
25. Telichenko V.I. Green technologies of living Environment: Concepts, terms, Standards. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(4):(103):364-372. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.364-372. EDN YNCVQX. (rus.).
26. Telichenko V.I., Benuzh A.A., Suhinina E.A. Interstate green standards of formation sustainable built environment vital activity. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):438-462. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.438-462. EDN EXLUMH. (rus.).
27. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Slesarev M.Yu. Analysis and synthesis of images of environmentally oriented innovative technologies of construction production. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(8):1298-1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDACL. (rus.).
28. Viktorov M.Yu. Digitalization in the field of investment and construction projects. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*. 2020; 10(4):(35):516-523. DOI: 10.21285/2227-2917-2020-4-516-523. EDN MLLUEV. (rus.).
29. Larionov A., Karacheva A. Digitalization as an innovative factor of reducing the time and increasing the quality of housing construction in the Moscow region. *Journal of Management Studies*. 2020; 6:30-57. EDN RIIKJT. (rus.).
30. Larionov A.N., Solovov V.V., Morozov A.A. Development of a capital expenditure model in the context of construction digitalization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(1):91-101. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.91-101. EDN OWNGYT. (rus.).
31. Volkodav V.A., Volkodav I.A. Development of the structure and composition of a building information classifier towards the application of BIM technologies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):867-906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906. EDN RGQGTG. (rus.).
32. Gusakova E.A. Information modeling of life cycle of high-rise construction projects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(1):(112):14-22. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.14-22. EDN YNHJXW. (rus.).
33. Larionov A.N., Prikhodko A.V. Further introduction of information modelling technologies in the course of implementation of investment projects in the field of housing construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):270-282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282. EDN ZVIYHH. (rus.).
34. Gusakova E.A., Ovchinnikov A.N. Prospects for the life cycle modeling of a capital construction facility using information flows. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1191-1200. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1191-1200. EDN BBAAAZ. (rus.).
35. Utkina V.N., Gryaznov S.U., Babushkina D.R. Problems and prospects of implementation of information modeling technology in the construction field of Russia: problems and prospects of implementation. *Economy, Governance and Law Basis*. 2019; 1(19):57-61. DOI: 10.51608/23058641_2019_1_57. EDN YPHGPG. (rus.).
36. Bolotova A.S., Marshavina Ja.I. Problems of the Implementation of BIM Technologies in Russia. *Construction Production*. 2021; 2:70-80. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_70. EDN PEYWAO. (rus.).
37. Larionov A.N., Prikhodko A.V. Assessment of the prospects for the use of information modeling technologies in housing construction in Russia for the period up to 2030. *Construction Economics*. 2022; 9:67-78. EDN DBQGIL. (rus.).

38. Buryachenko S., Voronin Z., Karachentseva I., Kuzmenkov A., Popova O. Factors influencing the rating of low-rise wooden houses as “green” buildings. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:05018. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305018

39. Kuzmenkov A.A., Karachentseva I.A., Derbenev A.V. Substantiation of constructive and technological solutions for an experimental low-rise wooden house in accordance with the principles of “Green Building”. *Resources and Technology*. 2021; 18(1):66-93. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5522. EDN VTLGWT. (rus.).

40. Kuzmenkov A., Kaychenov A., Karachentseva I., Vasileva Z., Buryachenko S., Voronin Z. Information model of green building research in the Arctic: methodological aspects. *E3S Web of Conferences*. 2023; 420:03021. DOI: 10.1051/e3sconf/202342003021

41. Kuzmenkov A., Kolesnikov G., Voronin Z. Green Technologies of Wooden Building for Arctic. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 385-398. DOI: 10.1007/978-3-030-94770-5_30

42. Buryachenko S.Yu., Karachentseva I.M., Voronin Z.A., Kuzmenkov A.A. The influence of enclosing structures of walls on the energy efficiency of a wooden building (on the example of the international project KO 1089 “Green Arctic Building”). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 539(1):012024. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012024

43. Kuzmenkov A., Tikhonov E., Kolesnikov G. Thermal bridges in wall panels of wooden frame houses. *Proceedings of EECE 2019*. 2020; 329-336. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_29

44. Karachentseva I., Kuzmenkov A., Kaychenov A., Voronin Z. Energy-efficient building materials for Arctic conditions as a criterion for “green building”. *E3S Web of Conferences*. 2023; 383:04075. DOI: 10.1051/e3sconf/202338304075

45. Buryachenko S., Voronin Z., Karachentseva I., Kuzmenkov A., Popova O. Monitoring of thermophysical properties of wooden buildings envelopes in climatic conditions of Murmansk and Petrozavodsk. *E3S Web*

of Conferences. 2021; 244:05025. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405025

46. Kuzmenkov A., Karachentseva I. Refinement of thermal engineering calculations results taking into account actual materials characteristics. *E3S Web of Conferences*. 2023; 402:07001. DOI: 10.1051/e3sconf/202340207001

47. Kuzmenkov A.A., Kuvshinov D.A., Buryachenko S.Yu., Kaychenov A.V., Karachentseva I.M., Voronin Z.A. Monitoring system for temperature and relative humidity of the experimental building. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2131(5):052070. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052070

48. Kuzmenkov A., Buryachenko S., Kuvshinov D., Karachentseva I., Popova O., Voronin Z. et al. Humidity Regime of a Double Wooden Wall Made of Rounded Logs. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021; 1276-1284. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_142

49. Kaychenov A., Lukin S., Yarotskaya A., Selyakov I., Ereschenko V., Kuzmenkov A. Automated systems for monitoring microclimate parameters and electricity metering of an experimental building. *E3S Web of Conferences*. 2023; 389:02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202338902005

50. Kaychenov A.V., Lukin S.A., Yarotskaya A.A. Development of a system for automated monitoring of microclimate parameters and an automated system for monitoring and accounting for electricity of a model facility. *Vestnik of MSTU*. 2022; 25(4):298-304. DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-4-298-304. EDN ICJLSN. (rus.).

51. Stolyanov A., Zhuk A., Vlasov A., Maslov A., Kuranova L., Kaychenov A. Complex for modeling and optimization the sterilization process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 403(1):012016. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012016

52. Kaychenov A.V., Blagoveshchenskiy I.G. *Complex modernization of control systems for the processes of heat treatment of Arctic aquatic bioresources using intelligent technologies : monograph*. Kursk, 2022; 251. EDN QCTQSF. (rus.).

Received October 8, 2023.

Adopted in revised form on March 7, 2024.

Approved for publication on March 7, 2024.

BIONOTES: **Alexander A. Kuzmenkov** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Construction; **Petrozavodsk State University (PetrSU)**; 33 Lenin st., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; SPIN-code: 2863-5238, ID RSCI: 359459, Scopus: 57220389900, ORCID: 0000-0001-6365-4421; akka1977@bk.ru;

Alexander V. Kaychenov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation and Computer Engineering; **Murmansk Arctic State University (MAU)**; 13 Sportivnaya st., Murmansk, 183010, Russian Federation; SPIN-code: 7342-6350, ID RSCI: 544546, Scopus: 57210912615, ORCID: 0000-0002-0358-8888; kc_05@mail.ru.

Authors' contribution: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.