

## Комплексный подход к оценке жизненного цикла строительства на стадии проектирования с применением программных комплексов

Аксинья Васильевна Калинина, Марина Вячеславовна Петроченко

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);*

*г. Санкт-Петербург, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Описана актуальность внедрения в строительный проект оценки жизненного цикла (LCA) на стадии проектирования для количественной оценки экологического воздействия. LCA необходимо учитывать при проектировании зданий, претендующих на получение экологических стандартов. Применение программных комплексов для количественного расчета LCA является необходимым фактором получения баллов за LCA в большинстве экологических стандартов.

**Материалы и методы.** Для оценки выбросов углерода на всех стадиях проекта используются различные программные комплексы, автоматизирующие расчеты. Один из таких программных комплексов — One Click LCA (2015).

**Результаты.** Итоги расчетов выбросов углерода в программном комплексе One Click LCA (2015) представлены графически в виде диаграмм распределения выбросов углерода: по стадиям жизненного цикла (ЖЦ); относительно конструктивных элементов; сравнительные диаграммы в зависимости от разных характеристик. Программа позволяет определить категорию здания по выбросам углерода и параметры влияния (потенциал парникового эффекта, озоноразрушающая способность, потенциал окисления, потенциал эвтрофикации, истощение невозобновляемых источников энергии и др.).

**Выводы.** Применение программных комплексов для оценки ЖЦ здания помогает автоматизировать расчет выбросов углерода, что в свою очередь может способствовать подбору оптимальных технологических решений для проекта и достижению минимального экологического воздействия здания. Выявлено, что для точного расчета LCA требуется полная информация о строительном проекте, включающая данные о строительных материалах, потреблении энергии и воды, операциях на строительной площадке. В российских реалиях расчет осложняется тем, что у большинства производителей нет баз данных строительных материалов, которые содержат информацию о выбросе углерода. Если производители будут вкладываться в создание экологических деклараций продуктов (EPD), то расчет выбросов углерода будет достоверным.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** жизненный цикл здания, оценка жизненного цикла, декарбонизация, углеродный след, зеленое строительство, устойчивое развитие, зеленые стандарты

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Калинина А.В., Петроченко М.В. Комплексный подход к оценке жизненного цикла строительства на стадии проектирования с применением программных комплексов // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 1. Ст. 7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.7

*Автор, ответственный за переписку:* Аксинья Васильевна Калинина, [kalinina.av@edu.spbstu.ru](mailto:kalinina.av@edu.spbstu.ru).

## An integrated approach to the assessment of construction life cycles using software packages at the design stage

Aksin'ya V. Kalinina, Marina V. Petrochenko

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); Saint Petersburg, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The article focuses on the relevance of the Life Cycle Assessment (LCA) method, used to quantify the environmental impact of a construction project at the design stage. LCA must be addressed in the process of designing buildings that will apply for green building certificates. The use of LCA software is an essential factor for obtaining LCA scores required for the majority of green building certificates.

**Materials and methods.** The authors take advantage of various software packages, that make calculations and assess carbon emissions at each project stage. One of the software packages used by the authors is One Click LCA (2015).

**Results.** The results of carbon emission calculations, made using One Click LCA (2015), are presented graphically in the form of carbon emission charts broken down by the life cycle stages (LCS); structural elements presented as comparative charts depending on different characteristics. The software allows assigning categories to buildings depending on their carbon emissions and impact parameters such as the Global warming potential (GWP), the Ozone Depletion Potential (ODP), the Acidification Potential (AP), the Eutrophication Potential (EP), depletion of non-renewable energy sources, etc.

**Conclusions.** Software packages, used to assess life cycles of buildings, accelerate the calculation of carbon emissions, which can, in turn, streamline the selection of optimal engineering solutions for construction projects and minimize environmental impacts of buildings. It's been found that accurate LCA calculations require comprehensive information about construction projects, including data on construction materials, energy and water consumption, as well as construction site operations. In the context of Russia, calculations are more problematic, since most manufacturers do not have construction materials databases, that contain information on carbon emissions. If manufacturers invest in the issuance of environmental product declarations (EPD), calculations of carbon emissions will be trustworthy.

**KEYWORDS:** building life cycle, life cycle assessment, decarbonization, carbon footprint, green building, sustainable development, green standards

**FOR CITATION:** Kalinina A.V., Petrochenko M.V. An integrated approach to the assessment of construction life cycles using software packages at the design stage. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(1):7. URL: <http://nso-journal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.7

*Corresponding author:* Aksin'ya V. Kalinina, [kalinina.av@edu.spbstu.ru](mailto:kalinina.av@edu.spbstu.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия оценка экологического эффекта становится все более актуальной в строительной сфере. Методы оценки экологического эффекта включают в себя компьютерные модели оценки негативных экологических воздействий, модели оценки экологической эффективности городской застройки по интегральному показателю, чек-листы устойчивого развития и метод анализа жизненного цикла (Life Cycle Assessment — LCA) [1].

На строительство зданий и их эксплуатацию приходится до 30 % годовых выбросов парниковых газов в мире, поэтому реализовывать строительное производство необходимо с учетом минимизации отрицательного влияния. Этому способствует создание национальной стратегии низкоуглеродного развития и осуществление строительства с позиции экоориентированного ценообразования. К основным стратегиям, направленным на сокращение потребляемой энергии и выбросов углекислого газа, относятся сокращение объема необходимых материалов, замена традиционных материалов альтернативными с меньшим влиянием на окружающую среду, использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и минимизация возможных будущих воздействий на этапе проектирования [2–5].

Так как выбросы вредных веществ от производства и строительства можно разделить на энергетические, обусловленные потреблением топлива и энергии, и технологические, отражающие особенности сырья и технологических процессов, основной акцент делается на сокращении потребления энергии и использовании экологических материалов [6]. По этим причинам в строительной сфере большее значение приобретают следующие концепции: анализ LCA, оценка воздействия на окружающую среду (Environmental Impact Assessment — EIA), система экономического и экологического учета (System of Environmental and Economic Accounting — SEEA), анализ материального потока (Material Flow Analysis — MFA), а также интеграция методов оценки жизненного цикла (ЖЦ) и калькуляции затрат жизненного цикла (Life Cycle Costing — LCC) [7–9].

Методология LCA описана в стандартах ISO 14044:2006<sup>1</sup> и ГОСТ Р ИСО 14044-2007<sup>2</sup>, который идентичен международному стандарту. Данные стандарты определяют LCA как метод, включающий сбор информации, сопоставление и оценку входных и выходных потоков, а также возможных воздействий на окружающую среду на всем протяжении ЖЦ продукции. Основные задачи внедрения LCA — гибкое развитие городской инфраструктуры и интенсивная защита окружающей среды от негативных воздействий и вмешательств [10]. Так как вопросы влияния строительства на окружающую среду становятся более актуальными, оценка ЖЦ является полезным инструментом для оптимизации строительства, минимизации количественной оценки отрицательного воздействия от строительного проекта на каждом этапе срока службы здания, достижения целостного обзора проекта с возможностью внесения изменений в проектные решения с целью оптимизации энергоэффективности [11, 12]. Также оценка ЖЦ строительства важна для зданий, претендующих на соответствие экологическим стандартам, так как LCA служит одним из параметров для получения баллов в LEED, BREEAM, DGNB, GREEN ZOOM и в других стандартах [13].

Особое внимание при оценке ЖЦ строительного проекта уделяется строительным материалам. Существуют исследования различных низкоуглеродных материалов, которые могут влиять на общее энергопотребление здания и выделение углерода [14]. Также следует учитывать воздействие на окружающую среду на стадии устройства строительной площадки, а именно установить зависимость экологического показателя строительной площадки от эффективности организационно-технологических решений и составить экологически безопасные строительные планы производства работ на ранних этапах строительства [15, 16].

Использование энергетической модели здания имеет большое значение на раннем этапе проекти-

<sup>1</sup> ISO 14044:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.

<sup>2</sup> ГОСТ Р ИСО 14044-2007. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации.

рования, однако анализ потенциального улучшения экологических характеристик зданий на ранних этапах ограничен ввиду неполной информации о конструктивных элементах и применяемых материалах, которые могут изменяться в процессе проектирования. Облегчить данную задачу может интеграция LCA и информационного моделирования зданий (Building Information Modeling — BIM) для мониторинга широкого спектра вариантов строительства и их воздействия на окружающую среду на всех этапах ЖЦ проекта [17–19].

С целью максимально точного определения выбросов углерода на всех стадиях строительного производства и интегрирования релевантных энергоэффективных решений в проектирование зданий необходимо непрерывное применение LCA и учет всех факторов, влияющих на итоговый результат оценки выбросов.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Внедрение LCA в информационное моделирование возможно с помощью нескольких вариантов, среди которых автоматический отбор данных из BIM-модели и использование специализированных программных комплексов, которые помогают автоматизировать процессы расчета, определить показатели воздействия здания на окружающую среду и предоставляют результаты в графическом виде, что имеет большое значение для удобной интер-

претации и процессов совместного проектирования [20–22].

Чтобы провести анализ ЖЦ строительства, требуются ведомость материалов и энергетическая модель здания. Существуют программные комплексы (например, One Click LCA (2015, Tally), которые имеют возможность интеграции с Revit, Excel, IFC, IESVE, энергетическими моделями в формате gbXML и другими инструментами для BIM. Использование программных инструментов для оценки ЖЦ здания автоматизирует вычисления LCA, что упрощает и ускоряет проведение мониторинга ЖЦ, а также делает процесс более экономичным для интеграции на раннем этапе проектирования.

Для вычислений LCA в программных комплексах необходима подробная информация о конкретном строительном проекте или готовом здании. Например, в специализированном программном комплексе One Click LCA (2015) нужна следующая информация о здании: строительные материалы, годовое потребление энергии, годовое потребление воды, операции на строительной площадке, пространственные характеристики здания. Схема обязательных входных данных для расчета LCA представлена на рис. 1.

#### 1. Строительные материалы.

Оценка воздействия строительных материалов — обязательная часть расчета LCA для здания. Требуется информация о материалах фундаментных конструкций, вертикальных ограждающих кон-

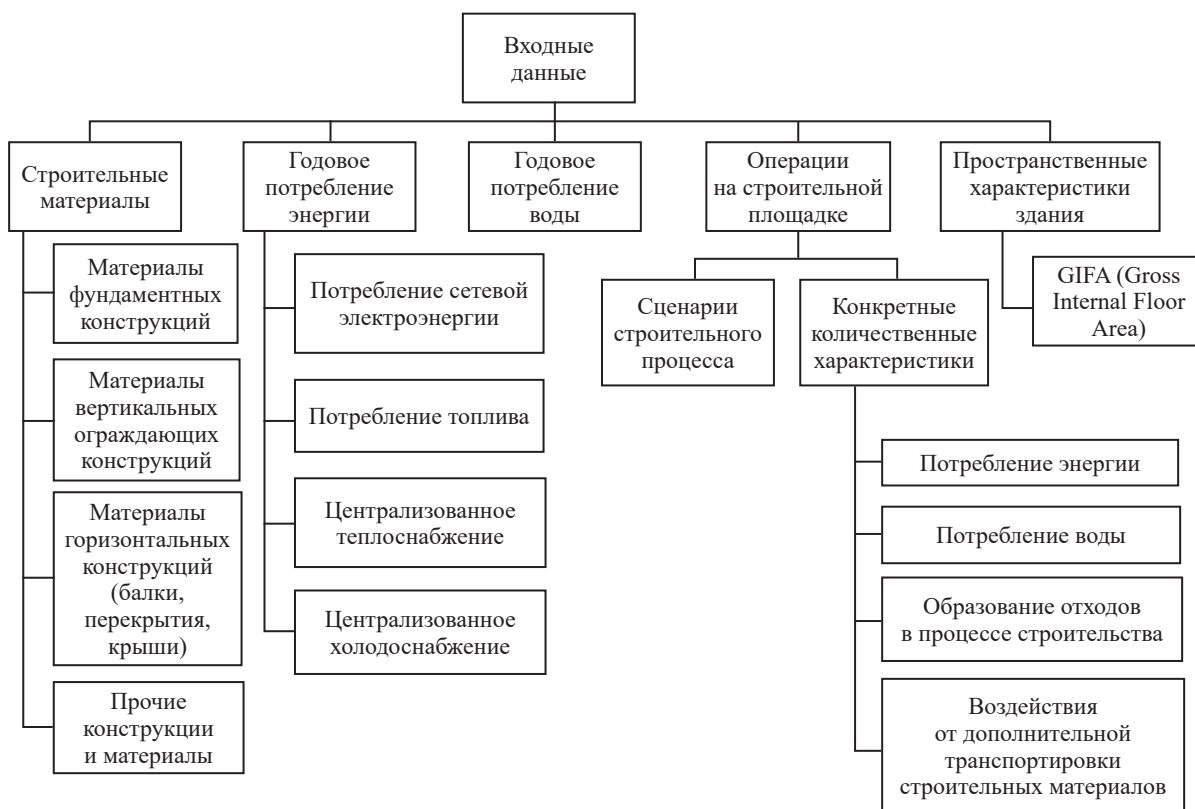


Рис. 1. Схема необходимых входных данных для расчета LCA

струкций и горизонтальных конструкций, которые включают перекрытия, балки и кровли. В расчете также учитываются материалы окон, дверей и отделочных слоев.

В программных комплексах для расчета влияния используются следующие параметры: объем материала, расстояние от места производства до строительной площадки, срок службы. Также может приниматься во внимание повторное применение материала.

Получить полную информацию о материалах позволяют базы данных. Для оценки ЖЦ существует два типа: базы данных LCA экологических деклараций продуктов (Environmental Product Declaration — EPD), общие базы сведений для типовых материалов. База данных EPD позволяет выбрать конкретный материал, произведенный конкретным производителем, и получить доступ ко всем характеристикам материала, необходимым для LCA. Общие базы информации для типовых элементов основаны на средних показателях по отрасли. С целью получения более точных и надежных результатов рекомендуется использование базы EPD.

Имеется несколько вариантов выбора материалов:

- если необходимый материал конкретного производителя с конкретными техническими характеристиками есть в базе данных, то для расчета выбирается он. К материалу также можно приравнять технически аналогичный материал того же производителя, имеющий другое название или торговую марку;

- в случае, когда требуемого материала нет в базе данных, то эту проблему можно решить выбором аналогичного материала от других производителей, которые обычно используются в стране, где предполагается строительство здания, или в соседних странах, у которых есть аналогичные строительные изделия или материалы;

- если в базе данных нет нужного материала и его аналога от другого производителя, то можно использовать общие данные универсального материала с аналогичными техническими характеристиками.

## 2. Годовое потребление энергии.

Расчетом учитывается энергопотребление здания, включающее потребление электроэнергии, топлива (например, для генераторов), энергии на теплоснабжение и холодоснабжение. Все категории энергопотребления выражены в количественных характеристиках, которые задаются в следующих единицах измерения: киловатт-час, мегаватт-час, мегаджоуль.

## 3. Годовое потребление воды.

Годовое потребление воды также принимается во внимание при оценке ЖЦ проекта. Необходимые сведения потребления выражены в количественных

характеристиках, которые задаются в кубических метрах, килограммах или тоннах.

## 4. Операции на строительной площадке.

Операции на строительной площадке для расчета LCA могут быть заданы в двух форматах — в формате сценария строительного процесса или в формате конкретных количественных характеристик.

Сценарии строительного процесса здания задаются в программных комплексах, если проект находится на ранних стадиях проектирования и нет полной информации об объекте. Сценарии подразумевают средние показатели потребления энергии, воды и топлива на строительной площадке, итоговые значения зависят от площади застройки.

Если о проекте есть полная информация, то вместо сценария задаются точные количественные показатели потребления энергии, топлива и воды на строительной площадке и показатели образования отходов в процессе строительства, выраженные в весовом эквиваленте и зависящие от транспортировки. В данном разделе также можно задать воздействия от транспортировки строительных материалов, которые требуют дополнительных выездов на площадку.

## 5. Пространственные характеристики здания.

В этом разделе учитывается площадь застройки. Также есть возможность указать такие дополнительные детали проекта, как вместимость здания, среднее число посетителей в день или в час.

Основным показателем является общая внутренняя площадь этажа (Gross Internal Floor Area — GIFA), измеренная до внутренней поверхности стен по периметру на уровне каждого этажа. Сведения о площади застройки зависят от страны, где планируется строительство здания, и всегда приводятся без учета парковок и зон движения автотранспорта, но с учетом подвалов.

Итоговое расчетное значение выбросов углерода представляет собой суммированные значения выбросов за все стадии ЖЦ здания.

Для строительных материалов, которые присутствуют в базах данных EPD, точно определены значения выбросов углерода на стадии производства (стадии A1–A3) в нескольких расчетных единицах ( $\text{кгCO}_2/\text{кг}$ ,  $\text{кгCO}_2/\text{м}^3$ ,  $\text{кгCO}_2/\text{м}^2$ ). Для материалов, у которых нет точно определенных значений, расчетные значения берутся либо как у аналогичных материалов, используются общие данные универсального материала с аналогичными техническими характеристиками. Соответственно, если есть информация об объеме материалов, выраженном в  $\text{кг}$ ,  $\text{м}^3$  или  $\text{м}^2$ , можно вычислить суммарное значение выбросов на этот объем.

Для параметров годового потребления энергии установлены значения выбросов углерода, выраженные в  $\text{кгCO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ . При заданных характеристиках потребления энергии также определяются суммарные значения выбросов углерода.



Для годового потребления воды значения выражаются  $\text{кгCO}_2/\text{м}^3$ , далее итоговые значения вычисляются в зависимости от объема потребляемой воды.

Для операций на площадке определяются параметры потребления энергии, топлива и воды, для которых также есть показатели выбросов углерода на единицу. Аналогично вышеупомянутым пунктам рассчитывается суммарное значение.

Значение также может быть выражено в  $\text{кг}/\text{м}^2$  для определения Embodied Carbon Benchmark. Embodied Carbon Benchmark — класс здания по выбросам углерода, один из основных показателей, представляющий собой шкалу количественного распределения выбросов за все время ЖЦ здания, выраженного в  $\text{кг}/\text{м}^2$ . Так, для класса *A* характерно минимальное количество выбросов углерода (менее  $300 \text{ кг}/\text{м}^2$ ), а для класса *G* — максимальные значения (более  $800 \text{ кг}/\text{м}^2$ ), промежуточные значения распределены по классам *B, C, D, E, F*.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результатами расчетов программных комплексов LCA являются следующие данные:

- категория здания Embodied Carbon Benchmark;
- диаграмма распределения выбросов углерода по стадиям ЖЦ (*A1–A3 Materials, A4 Transportations, B4–B5 Replacement, C1–C4 End of life*);
- диаграмма распределения выбросов углерода относительно конструктивных элементов (например, какая доля выбросов приходится на фундаменты, вертикальные ограждающие конструкции, несущие горизонтальные и вертикальные элементы и прочие конструктивные элементы);
- сравнительные диаграммы, если производился расчет нескольких вариантов проекта.

На информационных ресурсах One Click LCA (2015)<sup>3</sup> приведена информация о тестовых проектах, для которых заполнены необходимые характеристики и представлены результаты расчета. В качестве примера на рис. 2–4 приведены результаты расчета для офисного здания, запроектированного по европейским стандартам.

Согласно рис. 3 большая часть выбросов углерода (80 %) приходится на материалы. Это говорит о том, что именно при задании характеристик материалов необходимо учитывать конкретные данные для конкретных производителей, чтобы получить максимально точный результат. Также из этого следует, что наиболее рациональным решением для уменьшения показателей будет анализ информации о материалах и подбор альтернативных более экологических материалов.

В соответствии с рис. 4 большая часть выбросов (61 %) приходится на горизонтальные конструк-

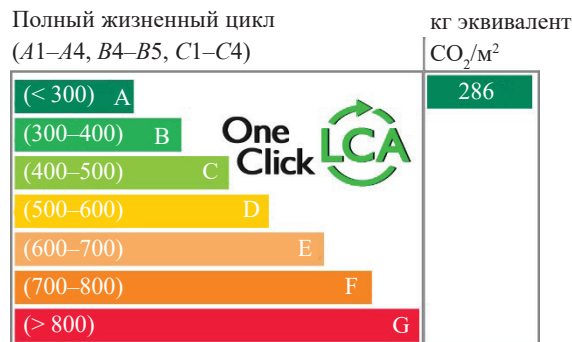


Рис. 2. Категория здания Embodied Carbon Benchmark для тестового здания в One Click LCA (2015)

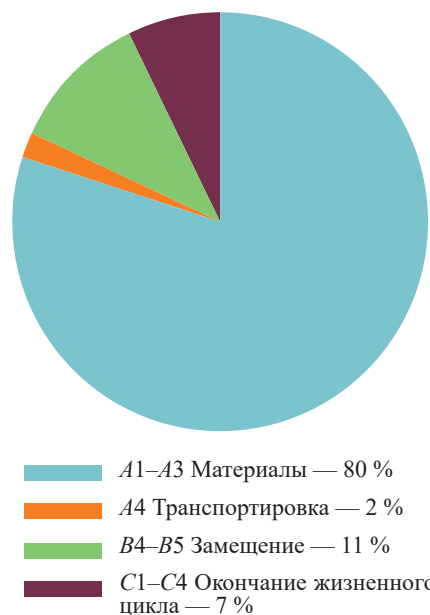


Рис. 3. Диаграмма распределения выбросов углерода по стадиям жизненного цикла в One Click LCA (2015)

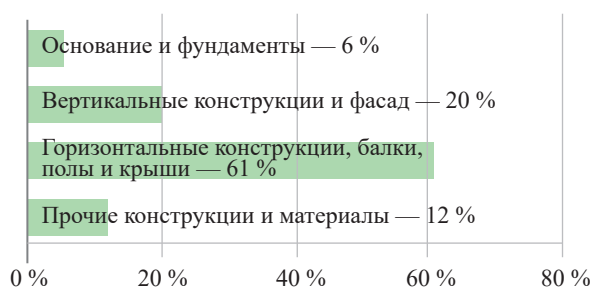


Рис. 4. Диаграмма распределения выбросов углерода относительно конструктивных элементов One Click LCA (2015)

ции, а именно на балки и перекрытия. Это позволяет сделать вывод о том, что при подборе альтернативных материалов необходимо уделить особое внимание именно этим конструкциям.

На основе таких данных рассчитываются региональные или глобальные последствия, которые отличаются для различных зданий в зависимости от климатических и территориальных условий

<sup>3</sup> One Click LCA (2015). Helsinki : Bionova Ltd. URL: <https://oneclicklcaapp.com/>

(что влияет на выбор конструктивных, архитектурных решений и подбор материалов) и типа потребляемой энергии [23]. К параметрам глобальных воздействий относятся: потенциал глобального потепления (Global warming potential — GWP), озоноразрушающая способность (Ozone Depletion Potential — ODP), потенциал окисления (Acidification Potential — AP), потенциал эвтрофикации (Eutrophication Potential — EP), образование озона в нижних слоях атмосферы (Formation of Ozone of Lower Atmosphere), истощение невозобновляемых источников энергии (Nonrenewable depletion of nonrenewable energy), потенциал образования смога (Smog Formation Potential — SFP), мера потребления энергии невозобновляемых источников энергии (нефть, газ, уголь) (Non-Renewable Energy Demand — NRED) и др. Все эти параметры также отражаются в результатах, полученных с помощью программных комплексов.

На рис. 5 представлены данные о вышеупомянутых показателях для трех альтернативных вариантов проекта.

Для получения баллов в разделе LCA большинства экологических стандартов проектная компания должна использовать какое-либо программное обеспечение LCA, привести количественные оценки необходимых параметров и продемонстрировать, как результаты расчета помогают направить процесс проектирования на оптимизацию затрат и снижение воздействия здания на окружающую среду. Именно поэтому анализ результатов LCA критически важен.

Анализ можно проводить, сравнивая воздействие строительных элементов и типов материалов и выявляя те, которые оказывают наибольшее влияние на каждом этапе ЖЦ. Установив такие элементы или материалы, можно провести некоторые изменения в проектных решениях и проследить, как они повлияют на итоговые результаты.

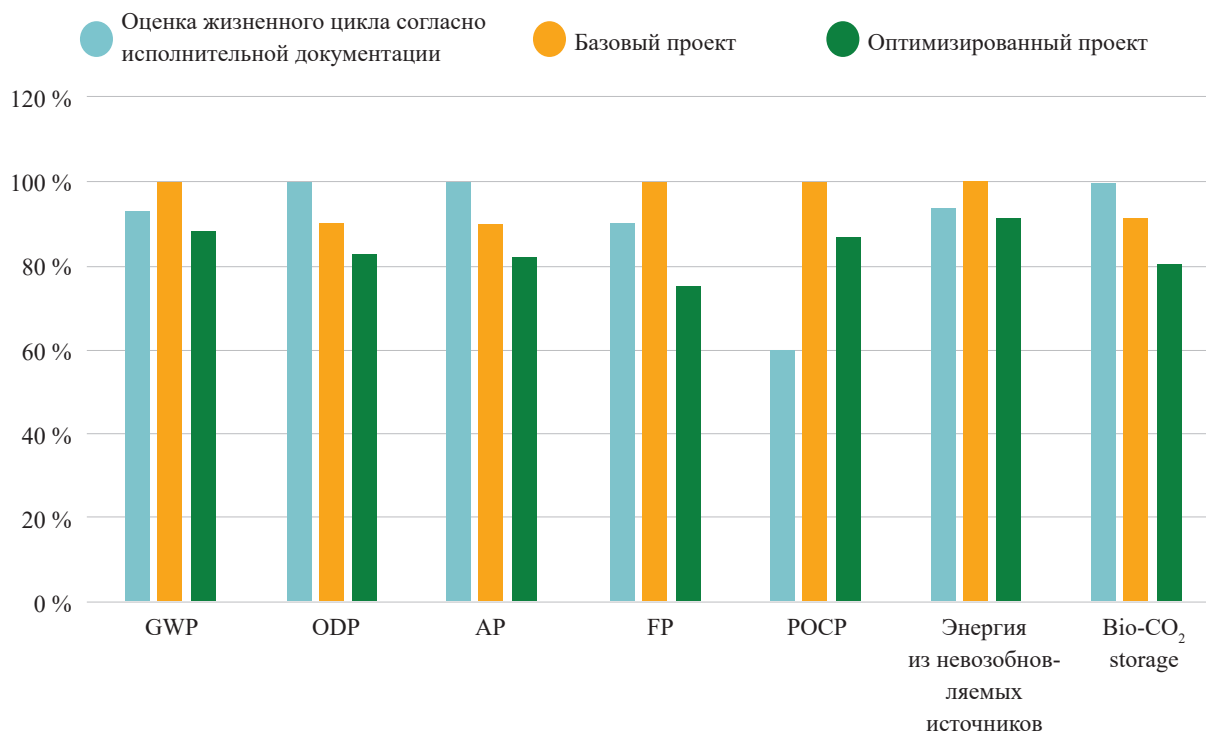


Рис. 5. Параметры воздействия здания на окружающую среду, рассчитанные в One Click LCA (2015)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки ЖЦ необходима точная информация о строительных материалах, потреблении энергии и воды, процессах на строительной площадке, а также данные о пространственных характеристиках здания.

В российских реалиях основной трудностью в расчете LCA с помощью программных комплексов является подбор данных о строительных материалах, так как ввиду отсутствия базы данных EPD для большинства производителей строительных материалов нет точной информации о показателях, влияющих на расчет LCA. Это приводит к некорректной

информации о стадиях A1–A3 (стадии производства материалов), вклад от которых в суммарные выбросы углерода — наибольший.

Решением этой проблемы может быть выбор альтернативных материалов с аналогичными техническими характеристиками или корректировка информации о материале в соответствии с общими данными универсального материала.

Если производители продукции для строительства будут вкладываться в создание EPD, то расчет LCA будет точнее, что может создать в России тенденцию к учету оценки ЖЦ при проектировании зданий.

Использование программных комплексов для LCA помогает автоматизировать расчеты и облегчить доступ к различным базам данных, которые учитываются при расчете. Преимуществом применения программных комплексов является визуальное представление результатов в виде диаграмм. Например, в программном комплексе One Click LCA (2015) результаты расчета дают информацию о категории здания по Embodied Carbon Benchmark, а также предоставляют диаграммы распределения выбросов углерода по стадиям ЖЦ

и выбросов углерода относительно конструктивных элементов.

Внедрение методов LCA может помочь уменьшить экологический эффект от строительства, но для этого необходимо учитывать все технические показатели строительного проекта, проводить анализ результатов расчета, создавать альтернативные варианты проектов с меньшим экологическим эффектом и сравнивать их по показателям выбросов углерода и другим параметрам воздействия на окружающую среду.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ковалев А.О. Методы оценки экологического воздействия на городскую среду // Символ науки : международный научный журнал. 2016. № 11–3 (23). С. 83–86.
2. Ефимов В.И. Мифы и реальность углеродного следа // Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование : мат. XVI Междунар. науч.-практ. конф. Российского общества экологической экономики. 2021. С. 60–62.
3. Лотникова Д.Ю. «Зеленая трансформация» России в рамках глобального тренда на декарбонизацию // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2021. № 3. С. 62–71.
4. Крутилова М.О. Направления совершенствования экономических механизмов минимизации выбросов парниковых газов в течение жизненного цикла здания // Экономика строительства и природопользования. 2018. № 1 (66). С. 63–71.
5. Мейрембаев А.С. Энергоэффективное проектирование зданий в контексте жизненного цикла здания // Наука и образование сегодня. 2020. № 6–1 (53). С. 92–93.
6. Гусева Т.В., Щелчков К.А. Декарбонизация промышленности: аспекты нормирования российских предприятий // Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование : мат. XVI Междунар. науч.-практ. конф. Российского общества экологической экономики. 2021. С. 49–50.
7. Buyle M., Braet J., Audenaert A. Life cycle assessment in the construction sector: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 26. Pp. 379–388. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.001
8. Santos R., Costa A.A., Silvestre J.D., Vandenberg T., Pyl L. BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe // Building and Environment. 2020. Vol. 169. P. 106568. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106568
9. Dieterle M., Viere T. Bridging product life cycle gaps in LCA & LCC towards a circular economy // Procedia CIRP. 2021. Vol. 98. Pp. 354–357. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.116
10. Семенова С.А., Мельникова Е.В. Экологическая целесообразность применения контрактов LCA в градостроительной деятельности // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 1. С. 93–100. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-11093
11. Vigovskaya A., Aleksandrova O., Bulgakov B. Life cycle assessment (LCA) in building materials industry // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106. P. 08059. DOI: 10.1051/mateconf/201710608059
12. Vigovskaya A., Aleksandrova O., Bulgakov B. Life Cycle Assessment (LCA) of a LEED certified building // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365 (2). P. 022007. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022007
13. Veselka J., Nehasilová M., Dvořáková K., Ryklová P., Volf M., Růžička J. et al. Recommendations for developing a BIM for the purpose of LCA in green building certifications // Sustainability. 2020. Vol. 12 (15). P. 6151. DOI: 10.3390/su12156151
14. Cabeza L.F., Barreneche C., Miró L., Morera J.M., Bartoli E., Fernandez A.I. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 23. Pp. 536–542. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.017
15. Латидус А.А., Македонска Р.Л. Оценка экологического показателя при устройстве строительной площадки // Строительное производство. 2019. № 3. С. 4–10.
16. Li X., Zhang Z., Zhu Y. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes // Building and Environment. 2010. Vol. 45. Issue 3. Pp. 766–775. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.08.010
17. Gao H., Koch C., Wu Y. Building information modelling based building energy modelling: A review // Applied Energy. 2019. Vol. 238. Pp. 320–343. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.032
18. Röck M., Hollberg A., Habert G., Panser A. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages // Building and Environment. 2018. Vol. 140. Pp. 153–161. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.006
19. Cavalliere C., Habert G., Dell’Osso G.R., Hollberg A. Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design

process // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 211. Pp. 941–952. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.247

20. *Obrecht T.P., Röck M., Hoxha E., Passer A.* BIM and LCA Integration: A systematic literature review // Sustainability. 2020. Vol. 12 (14). P. 5534. DOI: 10.3390/su12145534

21. *Hollberg A., Genova G., Habert G.* Evaluation of BIM-based LCA results for building design // Automation in Construction. 2020. Vol. 109. P. 102972. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102972

22. *Hollberg A., Kiss B., Röck M., Soust-Verdager B., Wiberge A.H., Lasvaux S. et al.* Review of visualising LCA results in the design process of buildings // Building and Environment. 2021. Vol. 190. P. 107530. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107530

23. *Ramesh T., Prakash R., Shukla K.* Life cycle energy analysis of buildings: An overview // Energy and Buildings. 2010. Vol. 42. Pp. 1592–1600. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.007

*Поступила в редакцию 21 декабря 2021 г.*

*Принята в доработанном виде 19 января 2022 г.*

*Одобрена для публикации 19 января 2022 г.*

**ОБ АВТОРАХ:** **Аксинья Васильевна Калинина** — студентка; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 911914; kalinina.av@edu.spbstu.ru;

**Марина Вячеславовна Петроченко** — кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 589472, Scopus: 56233437400, ResearcherID: C-7573-2019, ORCID: 0000-0002-4865-5319; petrochenko\_mv@spbstu.ru.

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

In recent decades, environmental effect assessments have become increasingly relevant in the construction industry. Methods, used to assess environmental effects, include computer modeling of negative impact assessments, models of environmental efficiency of urban development using an integral index, checklists of sustainable development and Life Cycle Assessment (LCA) [1].

30 % of the world's annual greenhouse gas emissions are caused by the construction and operation of buildings. Hence, construction processes must be implemented with account taken of the minimization of negative impacts. This trend is strengthened by the establishment of a national strategy towards low-carbon development and the implementation of construction processes from the standpoint of eco-focused pricing. The main strategies to reduce energy consumption and carbon dioxide emissions include reducing the amount of materials needed, replacing traditional materials with alternatives featuring lower environmental impacts, using renewable energy sources (RES) and minimizing possible future impacts at the design stage [2–5].

Since the emissions of harmful substances can be divided into energy-related ones, caused by the consumption of fuel and energy, and technological ones, that are caused by the properties of raw materials and engineering processes, the main emphasis is placed on reducing the energy consumption and use of environment-friendly materials [6]. Hence, the following

concepts gain importance for the construction industry: LCA analysis, Environmental Impact Assessment (EIA), System of Environmental and Economic Accounting (SEEA), Material Flow Analysis (MFA), as well as the integration of Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC) methods [7–9].

LCA methodology is described in ISO 14044:2006<sup>1</sup> and GOST R ISO 14044-2007<sup>2</sup>, which is identical to the international standard. In these standards, LCA is defined as a method that encompasses the collection of information, comparison and evaluation of input and output data flows, as well as possible environmental impacts throughout the lifecycles of products. The main objectives of implemented LCAs is the flexible development of urban infrastructure and intensive protection of environment from negative impacts and interventions [10]. Since the environmental impact of construction becomes more relevant, LCA is a useful tool for optimizing construction, minimizing the negative impacts of construction projects at each stage of the building life cycle, attaining a holistic overview of projects with the possibility of modifying design solutions to optimize their energy efficiency [11, 12]. Also, the assessment of the lifecycle of construction is important for buildings claiming compliance with environmental standards, as LCA serves as one of parameters for ob-

<sup>1</sup>ISO 14044:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.

<sup>2</sup>GOST R ISO 14044-2007. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and recommendations.



taining points in LEED, BREEAM, DGNB, GREEN ZOOM and other standards [13].

Particular attention is paid to building materials when the life cycle of a construction project is assessed. Several studies address different low-carbon materials, that can affect the overall energy consumption of and carbon emission from buildings [14]. It is also necessary to take account of the environmental impact at the stage of the construction site arrangement, namely, to identify dependence between the environmental performance of a construction site and the effectiveness of organizational and engineering solutions and to make environmentally safe construction schedules at early stages of construction [15, 16].

The use of a building energy model is important at early stages of the design process, but the analysis of potential improvements in the environmental performance of buildings at early stages is limited due to the incomplete information on structural elements and materials to be used, because they may change in the course of the design process. This task can be simplified by integrating LCA with Building Information Modeling (BIM) to monitor a wide range of construction options and their environmental impacts throughout the project lifecycle [17–19].

The continuous application of LCA and the analysis of all factors affecting the final result of emission assessments are needed to evaluate carbon emissions as accurately as possible at all stages of construction

and integrate relevant energy efficiency solutions into building design.

## MATERIALS AND METHODS

LCA may be introduced in information modeling in different ways, including the automatic selection of BIM model data and the use of specialized software packages to computerize calculation processes, identify the environmental impact of a building and provide results in graphic formats, which are important for interpretation and co-design processes [20–22].

To analyze the lifecycle of construction, a list of materials and an energy model of the building are required. There are software packages (e.g., One Click LCA (2015, Tally) that may be integrated with Revit, Excel, IFC, IESVE, energy models in the gbXML format and other tools designated for BIM. Software tools for the assessment of building lifecycles computerize LCA calculations, making the lifecycle monitoring easier, faster, and more cost-effective if used at early stages of design processes.

LCA calculations, made using software packages, require detailed information about a specific construction project or a completed building. For example, software package One Click LCA (2015) needs the following building information: building materials, annual energy consumption, annual water consumption, construction site operations, and spatial characteristics of the building. The diagram of the input data, needed for the LCA calculation, is shown in Fig. 1.

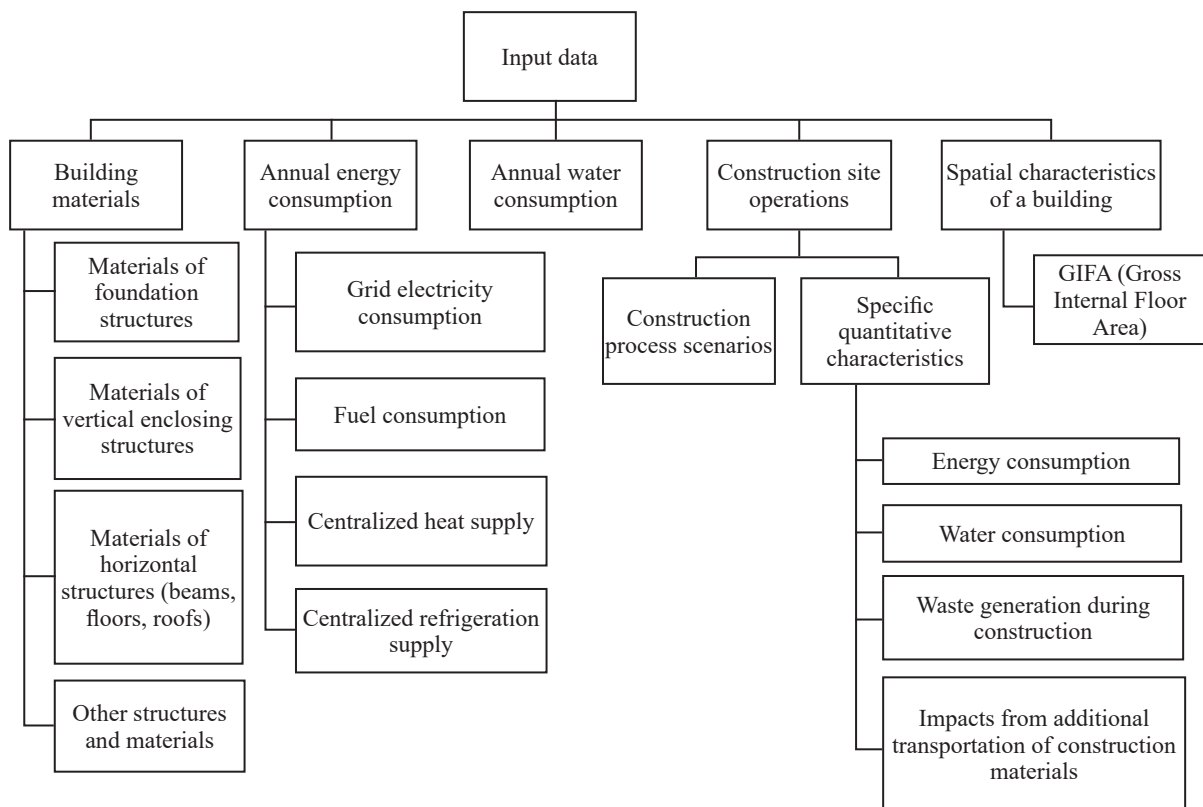


Fig. 1. The cell chart of the input data needed for the LCA calculation

### 1. Construction materials.

The assessment of the impact, made by construction materials, is a mandatory component of the LCA calculation for a building. Information about the materials of foundation structures, vertical building enclosures and horizontal structures, including floors, beams and roofs, is needed. The calculation also takes into account the material of windows, doors, and finishing coats.

Software packages use the following parameters to calculate the impact: the volume of the material, the distance from the production site to the construction site, and service life. Material reuse can also be taken into account.

Databases provide exhaustive information about materials. There are two types of databases used to assess lifecycles of buildings: LCA databases of Environmental Product Declarations (EPD) and general information databases for standard materials. An EPD database allows selecting specific materials produced by specific manufacturers and accessing all the material characteristics required for LCA. Shareable databases containing information on standard elements have average values typical for the industry. The use of the EPD database is recommended to obtain more accurate and reliable results.

The following material selection procedures exist:

- if the requested material, made by a specific manufacturer, has pre-set specifications and is available in the database, it is used for calculation purposes. The material, made by the same manufacturer, that has the same specifications, but its brand name is different, can be used instead;
- if the requested material is not in the database, the problem can be solved by choosing a similar material made by other manufacturers in the country where the building is to be constructed or in the neighbouring countries that have similar construction products or materials;
- if neither the requested material, nor its replacement, made by a different manufacturer, is available in the database, general data on the universal material, having similar specifications, can be used.

### 2. Annual energy consumption.

It encompasses the consumption of electricity, fuel (e.g., consumed by generators) and energy used for heating and cooling. All categories of energy consumption are expressed in measurable parameters, including kilowatt-hours, megawatt-hours, and megajoules.

### 3. Annual water consumption

Annual water consumption is also taken into account in the course of the project life cycle assessment. The requested consumption information is expressed in measurable parameters, such as cubic meters, kilograms or tonnes.

### 4. Construction site operations.

For the purpose of the LCA calculation, construction site operations can be specified in the following two

formats: the format of a construction process scenario or the format of specific quantitative characteristics.

Construction process scenarios are used by software packages if the project is in the early stage of design and there is no complete information about the construction facility. Scenarios imply average values of energy, water and fuel consumption at the construction site, while final values depend on the building area.

If complete information about the project is available, exact energy, fuel and water consumption values and construction waste generation rates replace scenarios. These values are expressed as weight equivalents; they depend on transportation. Here, one can also specify impacts from the transportation of construction materials, which require additional trips to the construction site.

### 5. Spatial characteristics of the building.

This section addresses the area of the building. Additional project details such as the building occupancy, the average number of visitors per day or per hour can also be entered here.

The main indicator is the Gross Internal Floor Area (GIFA), that represents the area enclosed by the inner surface of the walls along the building perimeter on each floor. The information on the building area varies depending on the country of the project implementation, and it is always provided net of any parking areas and transport routes, although it includes basements.

Total estimated carbon emissions are summarized carbon emissions at all lifecycle stages of a building.

At the production stage, carbon emission values (stages A1-A3) are accurately specified in several calculation units ( $\text{kgCO}_2\text{e/kg}$ ,  $\text{kgCO}_2\text{e/m}^3$ ,  $\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$ ) for construction materials that are present in EPD databases. For materials, that do not have precisely specified values, estimated values are used. They are typical for similar materials; general data on a universal material, having similar technical characteristics, are used. Accordingly, if information is available on the amount of materials expressed in  $\text{kg}$ ,  $\text{m}^3$  or  $\text{m}^2$ , the total emission value can be calculated.

Values of carbon emissions, expressed in  $\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$ , are set for parameters of annual energy consumption. Energy consumption characteristics determine the total value of carbon emissions.

Values are expressed in  $\text{kgCO}_2\text{e/m}^3$  for annual water consumption; final values correspond to the amount of water consumed.

For on-site operations, energy, fuel and water consumption parameters, as well as per-unit carbon emissions are determined. The total value is calculated according to the procedure specified above.

The value can also be expressed in  $\text{kg/m}^2$  to identify the Embodied Carbon Benchmark. Embodied Carbon Benchmark is a class of building carbon emissions, one of the main indicators, that represents a scale of the quantitative distribution of emissions over the entire life cycle of the building, expressed in  $\text{kg/m}^2$ . Hence, Class

A means the minimum amount of carbon emissions (less than 300 kg/m<sup>2</sup>), while Class G stands for maximum values (more than 800 kg/m<sup>2</sup>), and intermediate values are distributed between classes B, C, D, E, and F.

**RESEARCH RESULTS**

LCA calculation results, obtained by the software packages, represent the following data:

- Embodied Carbon Benchmark building category;
  - carbon emissions over the life cycle of a building (A1–A3 Materials, A4 Transportations, B4–B5 Replacement, C1–C4 End of life);
  - carbon emissions broken down by structural elements (for example, the share of emissions from foundations, vertical building envelopes, supporting horizontal and vertical elements and other structural elements);
  - comparative diagrams, if several project options are analyzed.

One Click LCA (2015) information resources<sup>3</sup> provide information on test projects for which the necessary characteristics are entered and calculation results are presented. As an example, Fig. 2–4 shows the calculation results for an office building designed according to European standards.

According to Fig. 3, the major portion of carbon emissions (80 %) comes from materials. This suggests that the characteristics of materials must be taken into account to get the most accurate result. The most rational way to reduce emissions is to analyze material information and select alternative, more environmentally friendly materials.

According to Fig. 4, the major portion of emissions (61 %) are from horizontal structures, namely beams and slabs. This leads to the conclusion that special attention must be paid to these structures when selecting alternative materials.

Regional and global impacts are calculated using these data. These impacts differ for different buildings depending on climate and local conditions (which affect the choice of design, architectural solutions and selection of materials) and the type of energy to be consumed [23]. Parameters of global impacts include Global warming potential (GWP), Ozone Depletion Potential (ODP), Acidification Potential (AP), Eutrophication Potential (EP), Formation of Ozone of Lower Atmosphere, Nonrenewable depletion of nonrenewable energy, Smog Formation Potential (SFP), Non-Renewable Energy Demand (NRED), etc. All these parameters are also conveyed in the results obtained with the help of software packages.

Fig. 5 shows the data on the above-mentioned indicators for three project alternatives.

To get points in the LCA section of most environmental standards, a design firm must use some LCA

software, have the required parameters calculated, and demonstrate how the calculation results can guide through the design process, optimize costs and reduce the environmental impact of the building. Hence, the analysis of LCA results is critical.

The analysis can be done by comparing the impact of building elements and types of materials and identifying those that have the greatest impact at each stage of the life cycle. By identifying such elements or ma-

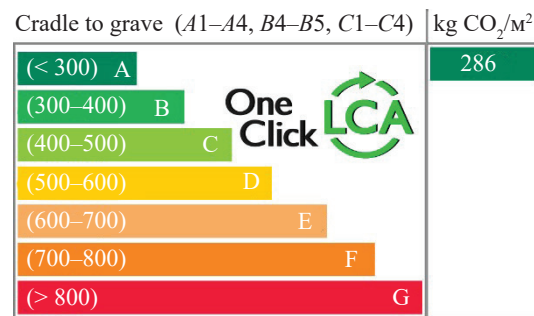


Fig. 2. Embodied Carbon Benchmark building category for a test building in One Click LCA (2015)

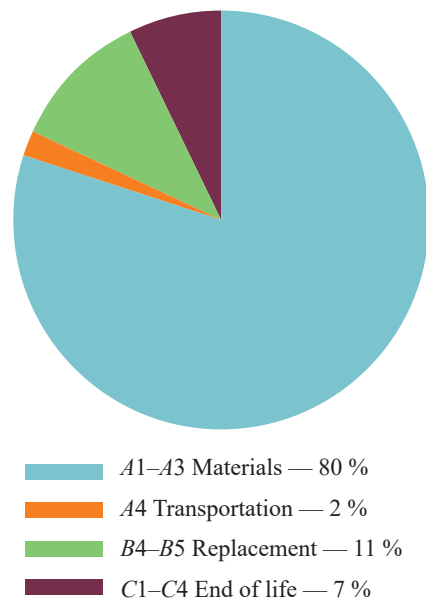


Fig. 3. The breakdown of carbon emissions by the lifecycle stages made in One Click LCA (2015)

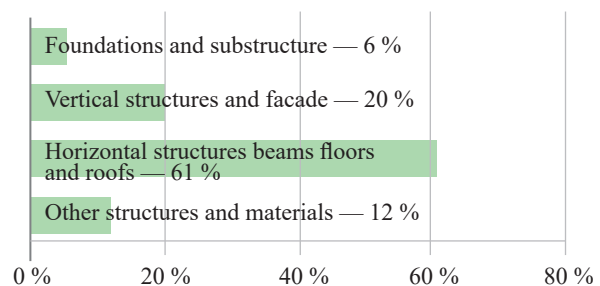


Fig. 4. The breakdown of carbon emissions by structural elements using One Click LCA (2015)

<sup>3</sup>One Click LCA (2015). Helsinki: Bionova Ltd. URL: <https://oneclicklcaapp.com/>

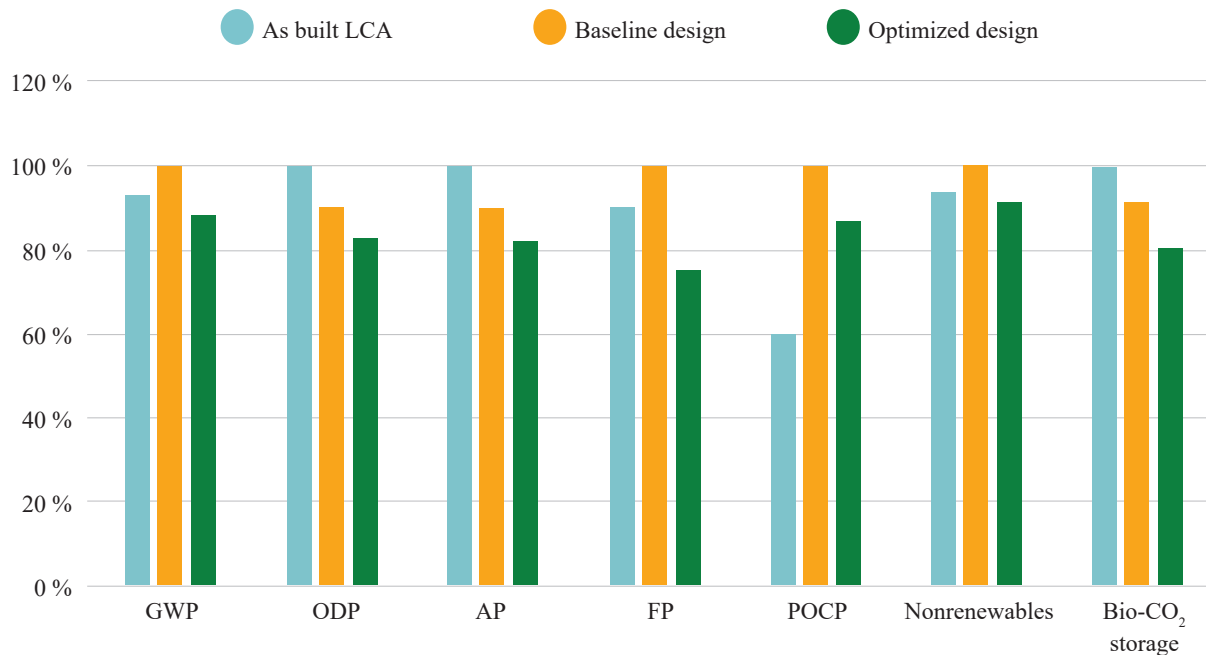


Fig. 5. Parameters of environmental impact of a building calculated in One Click LCA (2015)

materials, one can modify design solutions and see how these modifications affect final results.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

To estimate the LCA, accurate information about building materials, energy and water consumption, construction site processes, and data about the spatial characteristics of the building are needed.

Given Russia's circumstances, the main difficulty in calculating LCA with the help of software packages is the selection of data on construction materials, since there is no accurate information about the indicators that affect the calculation of LCA due to the lack of an EPD database for most manufacturers of construction materials. This leads to incorrect information on stages A1–A3 (stages of production of materials), whose share in the total carbon emissions is the largest.

The solution to this problem can be the selection of alternative materials with similar technical characteristics or adjusting the information about the material in accordance with the general data on a universal material.

If construction product manufacturers invest in the development of EPDs, LCA calculation will be more accurate. Hence, LCA will be more willingly calculated at the stage of the building design.

Using software packages to calculate LCA helps to computerize calculations and facilitate access to various databases that are taken into account in the calculations. The advantage of using software packages is the visual presentation of the results in the form of diagrams. For example, in One Click LCA (2015), calculation results encompass the Embodied Carbon Benchmark building category, as well as the diagrams showing the breakdown of carbon emissions by the life cycle stages and structural elements.

The implementation of LCA methods can help to reduce the environmental impact of construction. Towards this end, it is necessary to consider all technical indicators of the construction project, to analyze the calculation results, to create alternative project options with a lower environmental effect and compare them in terms of carbon emissions and other parameters of environmental impact.

## REFERENCES

1. Kovalev A.O. Methods for environmental impact assessment for urban environments. *Symbol of science: International Scientific Journal*. 2016; 11-3(23):83-86. (rus.).
2. Efimov V.I. Myths and reality of the carbon footprint. *Resource Economy, Climate Change and Environmental Management: Materials of the 16th International Scientific and Practical Conference of the Russian Society of Ecological Economics*. 2021; 60-62. (rus.).
3. Lotnikova D.Yu. Russia's "Green Transformation" as part of the global decarbonisation trend. *Electronic Network Political Journal "KubGTU Scientific Works"*. 2021; 3:62-71. (rus.).
4. Krutilova M.O. The nexus of life cycle phases on embodied carbon of buildings: an economic review. *Construction and Environmental Economics*. 2018; 1(66):63-71. (rus.).
5. Mejrembaev A.S. Energy-efficient building design in the building life cycle. *Science and Education Today*. 2020; 6-1(53):92-93. (rus.).
6. Guseva T.V., Shchelchikov K.A. Decarbonization of industry: aspects of the rationing of Russian



enterprises. *Resource Economy, Climate Change and Environmental Management: Materials of the 16th International Scientific and Practical Conference of the Russian Society of Ecological Economics*. 2021; 49-50. (rus.).

7. Buyle M., Braet J., Audenaert A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 26:379-388. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.001

8. Santos R., Costa A.A., Silvestre J.D., Vandenberg T., Pyl L. BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe. *Building and Environment*. 2020; 169:106568. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106568

9. Dieterle M., Viere T. Bridging product life cycle gaps in LCA & LCC towards a circular economy. *Procedia CIRP*. 2021; 98:354-357. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.116

10. Semenova S.A., Melnikova E.V. Environmental feasibility of applying LCA contracts in urban development. *Ecology of Urban Areas*. 2020; 1:93-100. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-11093 (rus.).

11. Vigovskaya A., Aleksandrova O., Bulgakov B. Life cycle assessment (LCA) in building materials industry. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:08059. DOI: 10.1051/mateconf/201710608059

12. Vigovskaya A., Aleksandrova O., Bulgakov B. Life Cycle Assessment (LCA) of a LEED certified building. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365(2):022007. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022007

13. Veselka J., Nehasilová M., Dvořáková K., Ryklová P., Volf M., Růžička J. et al. Recommendations for developing a BIM for the purpose of LCA in green building certifications. *Sustainability*. 2020; 12(15):6151. DOI: 10.3390/su12156151

14. Cabeza L.F., Barreneche C., Miró L., Mora J.M., Bartolí E., Fernandez A.I. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 23:36-542. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.017

15. Lapidus A.A., Makedonska R.L. Assessment of environmental performance at the construction site. *Construction Production*. 2019; 3:4-10. (rus.).

16. Li X., Zhang Z., Zhu Y. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. *Building and Environment*. 2010; 45(3):766-775. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.08.010

17. Gao H., Koch C., Wu Y. Building information modelling based building energy modelling: A review. *Applied Energy*. 2019; 238:320-343. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.032

18. Röck M., Hollberg A., Habert G., Passer A. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and Environment*. 2018; 140:153-161. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.006

19. Cavalliere C., Habert G., Dell'Osso G.R., Hollberg A. Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 211:941-952. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.247

20. Obrecht T.P., Röck M., Hoxha E., Passer A. BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. 2020; 12(14):5534. DOI: 10.3390/su12145534

21. Hollberg A., Genova G., Haberta G. Evaluation of BIM-based LCA results for building design. *Automation in Construction*. 2020; 109:102972. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102972

22. Hollberg A., Kiss B., Röck M., Soust-Verdaguer B., Wiberge A.H., Lasvaux S. et al. Review of visualising LCA results in the design process of buildings. *Building and Environment*. 2021; 190:107530. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107530

23. Ramesh T., Prakash R., Shukla K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*. 2010; 42:1592-1600. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.007

Received December 21, 2021.

Adopted in revised form on January 19, 2022.

Approved for publication on January 19, 2022.

**BIONOTES:** Aksin'ya V. Kalinina — student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); 29 Polytechnicheskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 911914; kalinina.av@edu.spbstu.ru;

**Marina V. Petrochenko** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); 29 Polytechnicheskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 589472, Scopus: 56233437400, ResearcherID: C-7573-2019, ORCID: 0000-0002-4865-5319; petrochenko\_mv@spbstu.ru.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflicts of interest.*