

## Экологическая токсичность по жизненному циклу строительных материалов

Петр Михайлович Жук

Московский архитектурный институт (Государственная академия) (МАРХИ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** На современном этапе приобретает значимость учет категории экологической токсичности (экоотоксичности) в оценке жизненного цикла строительных материалов в соответствии с методологией международных стандартов ИСО серии 14000.

**Материалы и методы.** Среди методов оценки экоотоксичности можно выделить две группы. К первой относятся тесты с применением живых организмов (пресноводных одноклеточных водорослей, ракообразных *Daphnia magna* Straus, эмбрионов рыб и светящихся бактерий), стандартизированные на международном уровне. Причем для разных материалов имеется специфика их применения: для плитных и пленочных — динамический тест на выщелачивание, а для зернистых — перколяция. Важно не только исследовать экоотоксичность для воды, но и почвы. Важными параметрами почвы в этом отношении становятся уровень активности биомассы микробов и фитотоксичность почв. Ко второй группе методов относят расчеты экоотоксичности в Comparative Toxic Unit, CTU<sub>e</sub>.

**Результаты.** Проведены исследования для строительных материалов из разных групп по виду основного сырья, которые дали результаты, связанные с корреляцией данных по воде и почве. Адекватность проведенных испытаний и расчетов подтверждена сравнением с уже имевшимися для ряда материалов исследованиями зарубежных специалистов.

**Выводы.** Из полученных данных можно сделать выводы о применении методов тестирования экоотоксичности в качестве дополнительных при оценке строительных материалов, так как только при биологической индикации можно переходить к установлению конкретных токсинов химико-аналитическими способами. Также сделаны предложения по совершенствованию нормативной правовой базы в области определения экоотоксичности при оценке жизненного цикла строительных материалов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** экологическая токсичность, строительные материалы, оценка жизненного цикла

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Жук П.М. Экологическая токсичность по жизненному циклу строительных материалов // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 4. Ст. 10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.10

Автор, ответственный за переписку: Петр Михайлович Жук, peter\_05@bk.ru.

## Ecological toxicity through the life cycle of building materials

Petr M. Zhuk

Moscow Institute of Architecture (State Academy) (MARKHI); Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** At the present stage it is becoming important to take into account the category of environmental toxicity (ecotoxicity) in the life cycle assessment of building materials in accordance with the methodology of international standards ISO 14000 series. Among the methods of ecotoxicity assessment, two groups can be distinguished. The first includes tests using living organisms (freshwater unicellular algae, crustaceans *Daphnia magna* Straus, fish embryos and luminous bacteria), standardized at the international level. Moreover, there are specifics of their application for different materials: for slab and film materials - dynamic leaching test, and for granular materials - percolation. It is important not only to study ecotoxicity for water, but also for soil. The level of microbial biomass activity and phytotoxicity of soils become important soil parameters in this respect. The second group of methods includes ecotoxicity calculations in the Comparative Toxic Unit, CTU<sub>e</sub>. Studies were carried out for building materials from different groups by the type of basic raw materials, which gave results related to the correlation of data on water and soil. The adequacy of the tests and calculations was confirmed by comparison with the studies of foreign specialists already available for a number of materials. From the obtained data it is possible to draw conclusions about the application of ecotoxicity testing methods as additional methods in the assessment of construction materials, since only in the case of biological indication it is possible to proceed to the establishment of specific toxins by chemical-analytical methods. Proposals are also made to improve the regulatory legal framework in the field of ecotoxicity determination in the life cycle assessment of construction materials.

The subject of the study is ecological toxicity indicators of building materials of different nomenclature and methods of their determination. Several methods of ecotoxicity testing as well as calculation of the indicator within the framework of life cycle assessment of building materials are considered. The study of ecotoxicity category indicators will improve the quality of life cycle assessment of building materials.

**Materials and methods.** Comparison of methods for determining ecological toxicity, both in terms of testing on living organisms (both domestic and international standards), as well as in terms of calculations of toxicity indicators for humans and

ecotoxicity was carried out. A research scheme was developed in which ecotoxicity becomes a key indicator for further studies of the characteristics of natural-technogenic systems.

**Results.** A study was carried out in which ecotoxicity was determined for the same materials by tests in the aquatic environment as well as soil samples from sites associated with the life cycle of the materials. In addition, the calculated ecotoxicity values were analyzed and compared with studies by others. The adequacy of the results obtained was confirmed.

**Conclusions.** Advantages and disadvantages of different methods of ecotoxicity determination are analyzed, assumptions are made about possible correlation of the results with the data obtained in studies of natural-technogenic systems. Proposals for improvement of the regulatory framework in the field of ecotoxicity determination and directions for further research are made.

**KEYWORDS:** ecological toxicity, building materials, life cycle assessment

**FOR CITATION:** Zhuk P.M. Ecological toxicity through the life cycle of building materials. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(4):10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.10

*Corresponding author:* Petr M. Zhuk, [peter\\_05@bk.ru](mailto:peter_05@bk.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных критериев в рамках оценки воздействий на окружающую среду по жизненному циклу в соответствии с методологией международных стандартов ИСО серии 14000 является экологическая токсичность, которая справедливо выводится в ранг категорий воздействия. Каждая категория воздействия при применении стандарта ГОСТ Р ИСО 14044–2019<sup>1</sup> имеет показатели выбранного уровня. В частности, в качестве промежуточных параметров и примеров воздействия стандарт ГОСТ Р 56269–2014/ISO/TR 14047:2012<sup>2</sup> рассматривает концентрацию или присутствие токсических веществ в окружающей среде. А в качестве примеров воздействия конечных элементов категории экологической токсичности — популяции конкретных видов растений и животных. При этом возрастает роль показателей биологической индикации, начиная от выбора видов-индикаторов и заканчивая параметрами, оцениваемыми для этих видов [1, 2]. Одним из видов продукции, оценка жизненного цикла которой является особенно актуальной по причине постоянного роста объемов производства при развитии экономики, являются строительные материалы. В связи с растущими нагрузками на окружающую среду при производстве строительных материалов стоит уделить вопросу экологической токсичности (экоотоксичности) особенное внимание и рассмотреть методы определения показателей, а также проанализировать полученные показатели для отдельных строительных материалов. Исследование категории экологической токсичности является актуальным вопросом, которому посвящен целый ряд научных работ [3, 4].

Подходы к оценке токсичности для людей и экологической токсичности в разных странах и организациях могут сильно отличаться [5–8]. Также важным вопросом является изучение корреляции категории экоотоксичности с другими параметрами

оценки воздействий на окружающую среду по жизненному циклу, а также оценки состояния конкретных природно-техногенных систем.

Методическая база определения экоотоксичности включает исследования с помощью различных живых организмов, а также расчетные методы, которые на настоящий момент опираются на использование программного обеспечения. Изучение и применение этих методов, установление корреляции между некоторыми подходами является актуальным вопросом в современной оценке жизненного цикла строительных материалов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Под термином «токсичность для людей» понимают негативный потенциал воздействия вредных веществ на человека, который рассчитывается с учетом их попадания в атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды и почвы. При этом стоит принимать во внимание тот факт, что негативное влияние зависит не только от токсического потенциала вещества, но и от продолжительности пребывания вещества в конкретном компоненте геосферы. Количество определенного вредного вещества в воздухе, воде и почве помножается на весовой коэффициент, учитывающий его особенности, и в дальнейшем суммируется для всех веществ во всех средах. Потенциал токсичности для людей во многих исследованиях интерпретируется как количество вредного вещества на единицу массы тела человека, которое не вызывает негативных последствий, связанных с заболеваниями, функционированием органов и систем, снижением продолжительности жизни (понятие предельно допустимых концентраций, ПДК) [9]. При использовании в оценке воздействий предельно допустимых концентраций имеются два важных эффекта, которые пока недостаточно учитываются современными методиками. Во-первых, это одновременное совместное (синергетическое) воздействие сразу нескольких веществ, каждое из которых находится в пределах долей ПДК, но по негативному эффекту они усиливают друг друга, приводя к значительным последствиям. Во-вторых, методика предельно допустимых концентраций слабо учитывает биологическое накопление веществ в живых организмах. Попадая в них

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 14044–2019. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 56269–2014/ISO/TR 14047:2012. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Примеры применения ИСО 14044 к ситуациям воздействия.

минимальными долями в течение достаточно продолжительного периода, накапливающиеся вредные вещества могут приводить к серьезным негативным последствиям.

Токсичность для людей в современных оценках жизненного цикла подразделяется на связанную и не связанную с возникновением раковых заболеваний [6]. В частности, при расчете сравнительных единиц токсичности для людей (англ. Comparative Toxic Unit for Human,  $CTU_H$ ) выражается ожидаемый рост смертности среди всего населения, отнесенный к массовой единице выбрасываемого вещества (количество случаев на килограмм эмиссии). Используемая в этом мультимедийная модель консенсуса USEtox не учитывает отличия в пространственном расположении, в том числе континенты и регионы мира, при этом специфические группы химикатов требуют дальнейшей обработки [10–12].

В дополнение к потенциалу токсичности для людей необходимо учитывать также потенциал вредности фиксируемых на протяжении жизненного цикла веществ для функционирования экосистем. Эта категория оценки и будет называться экологической токсичностью, которая выражается двумя отдельными величинами для воды и почвы. Получаются эти

величины экотоксичности в результате умножения количества (массы) того или иного вещества на его весовой коэффициент. Существенным недостатком такого способа расчета является то, что попаданием вредного вещества из атмосферного воздуха в воду и почву в данной модели пренебрегают.

Из схемы на рисунке следует, что экотоксичность может определяться разными методами, а самое главное — она выступает ключевым показателем не только жизненного цикла строительных материалов, но и исследования состояния экосистем [13].

Таким образом, из схемы видно, что для различных целей могут оцениваться сами материалы, а также вода и почва с мест, связанных с жизненным циклом. Для всех этих исследований актуальны свои собственные методы. Рассмотрим некоторые из них, касающиеся, в первую очередь, экотоксичности самих строительных материалов.

Динамический тест на выщелачивание позволяет определять высвобождение неорганических и нелетучих органических соединений с единицы поверхности монолитных, плитных или пленочных строительных материалов в зависимости от продолжительности контакта с водой. При испытаниях измеряются и оцениваются такие параметры, как

Методы исследования загрязнений атмосферного воздуха, почвы, поверхностных и подземных вод

Расчет показателя токсичности для людей		Расчет показателя экотоксичности в сравнительных единицах экотоксичности ( $CTU_e$ )	
Токсичность для людей в сравнительных единицах токсичности для человека ( $CTU_H$ )		Экотоксичность для почвы	Экотоксичность для воды
Вещества, вызывающие раковые заболевания	Вещества, не вызывающие раковые заболевания	В модели не учитывается поступление вредных веществ из атмосферы в воду и почву	
Недостатки: сложность учета синергетического эффекта и эффекта биологического накопления; воздействия многих веществ требуют уточнения			

Определение экотоксичности	
Токсичность воды с использованием зеленых пресноводных одноклеточных водорослей Токсичность по выживаемости пресноводных ракообразных Определение токсичности воды по воздействию на икру рыб	Уровень активности биомассы почвы Количество патогенных микроорганизмов на единицу массы почвы Содержание яиц гельминтов на единицу массы почвы Колититр Фитотоксичность (по кратности) Генотоксичность (по росту числа мутаций в сравнении с контрольными образцами, по кратности)

Определение инженерно-экологических характеристик территории	Оценка биологического разнообразия
Экологическая емкость территории Репродуктивная способность территории Биогеохимическая активность территории	Расчет индексов биологического разнообразия: • индекс Симпсона; • индекс Шеннона
Оценка состояния экосистем	

Схема методов определения экотоксичности строительных материалов и сочетания этого процесса с иными исследованиями

размер образцов, качество воды, объем воды на единицу поверхности образца, время и температура.

Альтернативным способом для материалов зернистой структуры является определение перколяции в восходящем потоке, при котором учитывается выделение неорганических и нелетучих органических соединений в зависимости от соотношения «жидкость — твердая фаза».

Тест на токсичность для пресноводных водорослей проводится в соответствии со стандартом ГОСТ Р 54496–2011<sup>3</sup>. Определение биомассы водорослей производится путем замера флуоресценции хлорофилла с помощью титровальных микропластин. Имея данные по флуоресценции, можно сделать пересчет в количество клеток при помощи корреляционного фактора. На основе количества клеток рассчитывают скорость роста и возможные препятствия ему по сравнению с контрольными образцами.

Исследования на пресноводных ракообразных определяются стандартом ГОСТ Р 56236–2014<sup>4</sup>. Для дафний характерно партеногенетическое размножение, что означает возможность дальнейшего развития без оплодотворения. Чувствительность используемых в тестировании организмов регулярно перепроверяется с помощью дихромата кальция в качестве референсного вещества. Осуществляется регулярный контроль проводимости, водородного показателя и содержания кислорода элюата. На этапе растворения по 5 дафний в возрасте 2–24 ч помещаются в 2 сосуда (в сумме 10 дафний на каждый этап разбавления). Оценка токсического воздействия на дафний производится через сутки и через двое суток.

Следующие два теста есть в международных стандартах, но отсутствуют в отечественных. В частности, это касается испытаний онтогенеза эмбрионов рыб<sup>5</sup> и теста на светящихся бактериях<sup>6</sup>.

Все перечисленные методы касаются оценки состояния пресной воды. В отношении исследований биологических показателей почв следует отметить, что отбор проб, их подготовка для химического, бактериологического и гельминтологического анализа осуществляется в строгом соответствии с ГОСТ 17.4.4.02–2017<sup>7</sup>.

<sup>3</sup> ГОСТ Р 54496–2011 (ИСО 8692:2004). Вода. Определение токсичности с использованием зеленых пресноводных одноклеточных водорослей.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 56236–2014 (ИСО 6341:2012). Вода. Определение токсичности по выживаемости пресноводных ракообразных *Daphnia magna* Straus.

<sup>5</sup> ISO 15088:2007. Water quality. Determination of the acute toxicity of waste water to zebrafish eggs (*Danio rerio*).

<sup>6</sup> ISO 11348-2:2007. Water quality. Determination of the inhibitory effect of water samples on the light emission of *Vibrio fischeri* (Luminescent bacteria test). Part 2. Method using liquid-dried bacteria.

<sup>7</sup> ГОСТ 17.4.4.02–2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического и гельминтологического анализа.

Ключевым показателем состояния микробиоты почвы является уровень активности биомассы (микробов). Степень выраженности негативных процессов, происходящих в микробиоте, определяется по снижению уровня активности биомассы по сравнению с контрольными образцами. Допустимым обычно считается уменьшение активности не более чем в 5 раз.

Согласно стандартным методикам, определяют санитарно-гигиеническое состояние почвенного покрова по количеству патогенных микроорганизмов, приходящихся на 1 г почвы. Колититр представляет собой наименьшую массу образца почвы, измеряемую в граммах, в которой обнаруживается 1 кишечная палочка. Жизнеспособность этого вида бактерий сильно зависит от показателя кислотности почв. Например, в кислых почвах (уровень pH от 2,9 до 3,7) вымирание кишечной палочки происходит за 7–10 дней, а в нейтральной среде (уровень pH от 5,6 до 6,3) эта бактерия размножается и осуществляет жизнедеятельность более 3,5 месяцев. Затухание процесса размножения кишечной палочки быстрее происходит в поверхностных слоях почвы, снижаясь в песчаных грунтах в сравнении с суглинками. Любое количество яиц гельминтов в 1 кг почвы свидетельствует о ее загрязнении.

Почвенные пластинки являются методической основой определения фитотоксичности почв и позволяют фиксировать уменьшение количества проросших семян, высоту проростков и подавление их роста в сравнении с контрольными образцами. Критическим значением фитотоксичности, говорящим о значительной степени деградации почвенного покрова, является снижение количества проростков более чем в 2 раза. Показатель разнообразия мезофауны почв также характеризует экологическое состояние почв. Подсчет беспозвоночных проводят по сетке с длиной стороны 10 см с повторением 2 раза до глубины встречаемости представителей мезофауны.

Изучение генотоксичности — более сложное исследование мутагенов по сравнению с контрольными образцами. В почвах, претерпевших серьезные изменения, наблюдается увеличение количества мутаций более чем в 1000 раз.

Важны также показатели биологического разнообразия. В частности, речь может идти об индексах Симпсона и Шеннона. Например, для оценки жизненного цикла биотоплива на основе сельскохозяйственных культур [14].

Выбор материалов связан с разнообразием видов основного сырья и областей применения материалов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применяемые методы касались не только самих материалов, но и компонентов геосферы (в частности, почвенного покрова) в местах расположения этапов жизненного цикла этих материалов. Интересной при этом является попытка сопоставления результатов этих двух направлений исследований.

Табл. 1. Показатели экотоксичности для воды и почвы некоторых строительных материалов

Наименование строительного материала	рН	Тест на водорослях	Тест на дафниях	Икра рыб	Показатели почвы по жизненному циклу (наихудшие показатели)	
					Уровень активности биомассы (кратность уменьшения)	Фитотоксичность (кратность)
Полимербетон на основе эпоксидной смолы: • перколяция; • динамический тест на выщелачивание	9,6–9,7 9,3–9,5	2987 531	526 89	34 11	4,3	1,1
Гравий из пеностекла	9,6–9,8	5	≤ 2	≤ 2	1,3	1
Керамзитобетон	9,5–9,7	≤ 2	≤ 2	≤ 2	1,5	1,0
Газобетон на основе цемента	9,7–0,0	3	≤ 2	≤ 2	1,7	1,11
Пенопласт полистирольный: • перколяция; • динамический тест на выщелачивание	6,2–7,5	3761 678	632 98	42 21	4,9	1,13
Пенопласт пенополиуретановый: • перколяция; • динамический тест на выщелачивание	6,2–7,5	3997 712	679 114	53 26	5,1	1,18
Кровельная мембрана из полиизобутилена	6,2–7,2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	3,6	1,05
Кровельная мембрана из этиленпропилен-диенового мономера (EPDM)	5,6–8,1	5	≤ 2	≤ 2	2,2	1

Нахождение прямой корреляции при таком подходе вряд ли представляется возможным, но общая оценка жизненного цикла может быть дана с определенной степенью точности. Сложностью в реализации сравнительного анализа явились несколько разные сроки испытаний и разные среды. Для экотоксичности применялись сами материалы, а для оценки жизненного цикла образцы почвы с мест, связанных с их жизненным циклом. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Из табл. 1 можно сделать вывод, что материалы с содержанием полимерных компонентов демонстрируют более серьезные проблемы с экотоксичностью. В то же время один из показателей, который отражает нагрузки на окружающую среду по жизненному циклу материала, — это кратность уменьшения уровня активности биомассы (см. его изменения для неорганических материалов). Далее предлагается рассмотреть некоторые из токсических веществ, которые могут присутствовать в рассмотренных материалах.

Фторид был выделен из полимербетона на основе эпоксидной смолы, а также из гравия пеностекла в различном количестве (от 0,1 до 1,1 мг/л). Также полимербетон на основе эпоксидной смолы и гравия из пеностекла содержит хлорид (количество от 1 до 27 мг/л). Различное количество сульфатов в диапазоне от 1 до 6,8 мг/л содержатся в таких материалах, как кровельные мембраны, полимербетон и гравий из пеностекла. В случае кровельных

мембран были установлены в виде катионов повышенные величины цинка (от 40 до 100 мг/л), кальция (от 0,6 до 2 мг/л). В элюатах полимербетона на основе эпоксидной смолы были также установлены катионы серы, натрия, калия, магния, кальция, кремния, цинка, стронция, меди, марганца, бора, мышьяка, алюминия, молибдена, кобальта, ванадия.

Для пенопласта на основе пенополистирола особенно важным является присутствие такого вещества, как используемый в качестве антипирена гексабромциклододекан (НВСД). Это вещество и фторированные углеводороды представляют опасность с токсикологической точки зрения. НВСД в настоящее время все меньше применяется в производстве пенопластов, так как является устойчивым в окружающей среде, способен к биологическому накоплению, что следует учитывать при утилизации (переработке) изделий. В частности, он разрушается сольволизом или иными методами (например, с помощью высоких температур) [15, 16].

Помимо определения экотоксичности различными тестами с участием живых организмов стоит рассмотреть и расчетные методы определения экотоксичности, а также токсичности для людей по указанным выше формулам. Результаты определения параметров для различных строительных материалов приведены в табл. 2.

При сравнении данных о различных строительных материалах (функциональная единица — 1 кг) также все 3 показателя (раковая токсичность, нера-

Табл. 2. Расчетные показатели токсичности для людей и экотоксичности для различных строительных материалов

Наименование строительного материала	Результаты по данным источников [17, 18]			Результаты исследования		
	Токсичность для людей, $STU_h$		Экотоксичность, $STU_c$	Токсичность для людей, $STU_h$		Экотоксичность, $STU_c$
	канцерогены	не канцерогены		канцерогены	не канцерогены	
Рамы из алюминиевого сплава	2,19E-05	3,64E-04	421 838,75	2,17E-05	3,72E-04	445 724,52
Стальные рамы	1,67E-08	4,24E-08	47	1,72E-08	4,33E-08	54
Рамы из ПВХ	2,43E-05	1,39E-04	183 431,25	2,51E-05	1,44E-04	191 223,31
Пена из ППУ	2,06E-09	1,12E-07	303,64	2,11E-09	1,18E-07	311,58
Каменная вата	5,1E-09	1,2E-08	30,24	4,97E-09	1,13E-08	28,57

ковая токсичность и экотоксичность) хорошо коррелируют друг с другом. В целом из данных табл. 2 можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов исследования с данными, полученными зарубежными специалистами. Однако практически все параметры токсичности (экологической и для людей) в исследовании несколько выше, что стоит обосновывать некоторыми особенностями отечественного жизненного цикла всех рассмотренных материалов. Полученная информация может включаться в экологические декларации и использоваться для оценки жизненного цикла. По недостаткам, над которыми стоит работать в будущем, стоит упомянуть необходимость более подробного рассмотрения каждого из этапов жизненного цикла, чтобы не пропустить важной информации; также рекомендуются стандартизация методов расчета показателей, в том числе путем работы над программами по расчету, и формирование баз данных по показателям токсичности для людей и экотоксичности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование экотоксичности строительных материалов представляет интерес для идентификации и оценки выделения вредных веществ из самих материалов, а также в местах, связанных с их жизненным циклом. Безусловным преимуществом использования категории экотоксичности является реакция живых организмов на попадание вредных веществ, которое оценивается как при анализе элюатов материалов, так и в элементах среды (например, в почве). Это гораздо более полно характеризует ситуацию по сравнению с простым определением количества того или иного вредного вещества. При помощи определения экотоксичности возможно прояснение ситуации, какие из строительных материалов стоит изучить с помощью исчерпывающей химической аналитики. При помощи такого подхода (сначала определение экотоксичности, затем химическая аналитика и идентификация вредных веществ) можно экономить средства на дорогостоящих исследованиях. Таким образом, биологический подход к оценке совсем не противоречит химико-

аналитическому, а лишь является вспомогательной составляющей и дополнением. Общие затраты времени исследования экотоксичности элюатов (их влияния на водоросли, дафнии или светящиеся бактерии) составляют от суток до полутора. При этом при повышенных значениях токсичности можно прекращать испытания с соответствующими выводами. Далее можно при необходимости продолжать тестирование еще один день (например, провести эксперименты с зародышами рыб). Тесты на почве более затратны по времени, но в некоторых случаях дают более точный результат (например, кратность уровня активности биомассы). В затраты времени на исследования стоит включать подготовку проб, замеры и оценку данных. Следует отметить подчас сильные колебания данных исследования от пробы к пробе, что требует внимательных подходов к трактовке результатов. По времени определение экотоксичности вполне сопоставимо с исследованиями строительных материалов химико-аналитическими методами [4, 19, 20].

Категорию и результаты оценки экотоксичности легче включать в жизненный цикл по сравнению с параметрами биогеоценозов в местах, связанных с жизненным циклом строительных материалов, в том числе по причинам расчета на конкретную функциональную единицу. Однако на современном этапе ключевую роль начинают играть оценка биоразнообразия по жизненному циклу материалов. Для этих исследований тесты на экотоксичность также играют важную роль, так как помогают понять на качественном и количественном уровне токсические соединения, присутствующие в жизненном цикле строительных материалов.

Методы определения экотоксичности требуют внимательного рассмотрения некоторых важных вопросов, к которым можно отнести следующие:

- различие чувствительности используемых в тестах организмов;
- сравнение результатов тестов перколяции и динамического выщелачивания дает наиболее точные результаты и исключает неадекватные выводы;

• аккуратность трактовки полученных результатов и сопоставления различных методов определения экотоксичности.

Важным направлением является изучение корреляции категории экотоксичности с категорией токсичности для людей, а также с иными параметрами жизненного цикла (потенциал парникового эффекта, повышение кислотности, эвтрофикация, потенциал разрушения озонового слоя, потенциал образования фотооксидантов), а также с такими параметрами, как инженерно-экологические характеристики (экологическая емкость, репродуктивная

способность), биоиндикационные показатели, индексы биологического разнообразия.

Актуальными направлениями исследования темы являются разработки в сфере программного обеспечения систем по типу GABi, SimaPro, Ecoinvent, а также USEtox, позволяющих рассчитывать показатели экотоксичности по жизненному циклу в автоматическом режиме. Также стоит уделить внимание совершенствованию нормативной правовой базы. В частности, это касается некоторых стандартов по контролю качества воды методами определения экотоксичности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Груздев В.С.* Биоиндикация состояния окружающей среды. Сер. Научная мысль. М. : ИНФРА-М, 2018. 160 с. DOI: 10.12737/monography\_5a6f02e2738690.08466285

2. *Lindner J.P., Eberle U., Schmincke E., Luick R. et al.* Biodiversität in Ökobilanzen. Abschlussbericht des F+E-Vorhabens “Weiterentwicklung der Ökobilanzen durch Integration der Biodiversitätswirkungen von Produkten” (FKZ 3511 82 3100) // Bundesamt für Naturschutz. Bonn – Bad Godesberg, 2019. P. 242. DOI: 10.19217/skr528

3. Toxicity of Building materials. Ed. by F. Pacheco-Torgal, S. Jalali and A. Fucic. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Dehli, Woodhead Publishing, 2012. P. 486.

4. *Heisterkamp I., Gartiser S., Kretzschmar M., Schoknecht U. et al.* Methoden und Kriterien zur Bewertung der Ökotoxizität von Produkten. Dessau-Rosslau, Umweltbundesamt, 2022. P. 135.

5. *Kobeticova K., Černý R.* Ecotoxicology of building materials : a critical review of recent studies // Journal of Cleaner Production. 2017. P. 165. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.161

6. *Pacheco-Torgal F., Jalali S.* Toxicity of building materials: a key issue in sustainable construction // International Journal of Sustainable Engineering. 2011. DOI: 10.1080/19397038.2011.569583

7. *Rodrigues P., Silvestre J.D., Flores-Colen I., Viegas C.A., de Brito j., Kurad R. et al.* Methodology for the Assessment of the Ecotoxicological Potential of Construction Materials // Materials. 2017. Vol. 10. Issue 6. P. 649. DOI: 10.3390/ma10060649

8. *Pacheco-Torgal F.* Introduction to advances in the toxicity of construction and building materials // Advances in the Toxicity of Construction and Building Materials. 2022. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/B978-0-12-824533-0.00009-8

9. *Mötzl H., Zelger T.* Ökologie der Dämmstoffe. Grundlagen der Wärmedämmung. Lebenszyklusanalyse von Wärmedämmstoffen. Optimale Dämmstandards. Wien, Springer-Verlag, 2000. P. 195.

10. *Jungbluth N.* Bewertungsmethoden in der Ökobilanzierung. Schaffhausen, ESU-services GmbH, 2023. P. 31.

11. *Fantke P., Bijster M., Guignard C., Hauschild M., Huijbregts M., Jolliet O., et al.* USEtox® 2.0 Documentation (Version 1). 2017. DOI: 10.11581/DTU:00000011

12. *Wielandt Egemose C., Bastien D., Frette X., Birkved M., Sohn J.L.* Human toxicological impacts in life cycle assessment of circular economy of the built environment: a case study of denmark // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 130. DOI: 10.3390/buildings12020130

13. *Жук П.М., Лаврусевич А.А.* Геоэкологические аспекты анализа жизненного цикла строительных материалов // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2020. № 3. С. 99–111. DOI: 10.15593/2409–5125/2020.03.09

14. *Urban B., Von Haaren C., Kanning H., Krahl J., Munack A.* Spatially differentiated examination of Biodiversity in LCA (Life Cycle Assessment) on national scale exemplified by biofuels // Landbauforschung Volkenrode. 2012. Vol. 62. Issue 3.

15. *Zhukov A.D., Zhuk P.M., Stepina I.V.* Assessment of the environmental impact on the life cycle of polystyrene thermal insulation materials // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2388. P. 012101. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012101

16. *Жук П.М.* Оценка воздействий на окружающую среду жизненного цикла пенополиуретановой теплоизоляции в строительстве // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-снабжение и строительная теплофизика. 2023. № 7. С. 48–51.

17. *Rey-Álvarez B., Silvestre J., Garsía-Martínes A., Sanches-Montañés B.* A comparative approach to evaluate the toxicity of building materials through life cycle assessment // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 26. Issue 912. P. 168897. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168897

18. Rey-Álvarez B., Sanches-Montañés B., Garsía-Martínes A. Building material toxicity and life cycle assessment: A systematic critical review // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 341. P. 130838. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130838
19. Heisterkamp I., Gartiser S., Schoknecht U., Happel O., Kalbe U., Kretschmar M., et al. Investigating the ecotoxicity of construction product eluates

as multicomponent mixtures // *Environmental Sciences Europe*. 2023. No. 3. DOI: 10.1186/s12302-023-00711-w

20. Bandow N., Gartiser S., Ilvonen O., Schoknecht U. Evaluation of the impact of construction products on the environment by leaching of possibly hazardous substances // *Environmental Sciences Europe*. 2018. Vol. 30. P. 14. DOI: 10.1186/s12302-018-0144-2

Поступила в редакцию 27 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 8 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 8 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Петр Михайлович Жук** — доктор технических наук, доцент, декан факультета бакалавриата; **Московский архитектурный институт (государственная академия) (МАРХИ)**; 107031, г. Москва, ул. Рождественка, д. 11/4, корп. 1, стр. 4; SPIN-код: 2547-0781, ORCID: 0000-0001-6257-4710; peter\_05@bk.ru.

## INTRODUCTION

One of the important criteria within the life cycle assessment of environmental impacts in accordance with the methodology of ISO 14000 series international standards is environmental toxicity, which is rightly placed in the rank of impact categories. Each category of impact in the application of GOST R ISO 14044–2019<sup>1</sup> standard has indicators of the selected level. In particular, as intermediate parameters and examples of impact standard GOST R 56269–2014/ISO/TR 14047:2012<sup>2</sup> considers the concentration or presence of toxic substances in the environment. In addition, as examples of exposure of the final elements of the environmental toxicity category, populations of specific plant and animal species. At the same time, the role of biological indication indicators is increasing, from the choice of indicator species to the parameters evaluated for these species [1, 2]. One of the types of products, the life cycle assessment of which is particularly relevant due to the constant growth of production volumes during the development of the economy, is building materials. Due to the growing environmental loads in the production of building materials, it is worth paying special attention to the issue of environmental toxicity (ecotoxicity) and considering the methods of determining the indicators, as well as analyzing the obtained indicators for individual building materials. The study of the category of environmental toxicity is a topical issue, which is the subject of a number of scientific works [3, 4].

Approaches to the assessment of toxicity to humans and ecological toxicity can vary greatly between countries and organizations [5–8]. It is also an important

issue to study the correlation of the ecotoxicity category with other parameters of life cycle assessment of environmental impacts, as well as assessment of the state of specific natural-technogenic systems.

The methodological basis for the determination of ecotoxicity includes studies using various living organisms, as well as computational methods, which currently rely on the use of software. The study and application of these methods and the establishment of correlations between some approaches is a topical issue in modern life cycle assessment of building materials.

## MATERIALS AND METHODS

The term “toxicity to humans” is understood as the negative potential for human exposure to harmful substances, which is calculated taking into account their ingress into atmospheric air, surface and ground water and soil. It is worth taking into account the fact that the negative impact depends not only on the toxic potential of the substance, but also on the duration of the substance’s stay in a particular component of the geosphere. The amount of a particular harmful substance in air, water and soil is multiplied by a weighting factor that takes into account its specific characteristics and is further summarized for all substances in all media. The toxicity potential for humans in many studies is interpreted as the amount of a harmful substance per unit of human body weight that does not cause adverse effects associated with diseases, functioning of organs and systems, and reduced life expectancy (the concept of maximum permissible concentrations, MPC) [9]. When using maximum permissible concentrations in the assessment of impacts, there are two important effects that are not yet sufficiently taken into account by modern methods. Firstly, it is a simultaneous joint (synergistic) impact of several substances, each of which is within a fraction of MPC, but in terms of negative effect, they reinforce each other, leading to significant consequences. Secondly, the methodology of maxi-

<sup>1</sup> GOST R ISO 14044–2019. Environmental management. Life cycle assessment.

<sup>2</sup> GOST R 56269–2014/ISO/TR 14047:2012. Environmental management. Life cycle assessment. Examples of the application of ISO 14044 to exposure situations. Examples of application of ISO 14044 to exposure situations.

imum permissible concentrations poorly takes into account the biological accumulation of substances in living organisms. Entering them in minimal fractions over a sufficiently long period of time, accumulated harmful substances can lead to serious adverse effects.

Toxicity to humans in modern life cycle assessments is subdivided into cancer-related and non-cancer-related [6]. In particular, the calculation of Comparative Toxic Units for Human ( $CTU_h$ ) expresses the expected increase in mortality in the whole population attributed to the mass unit of the emitted substance (number of cases per kilogram of emission). The USEtox multimedia consensus model used in this does not take into account differences in spatial location, including continents and regions of the world, with specific chemical groups requiring further processing [10–12].

In addition to the potential for toxicity to humans, the potential for harm to ecosystem function of life-cycle fixed substances must also be considered. This category of assessment will be referred to as ecological toxicity, which is expressed as two separate values for water and soil. These ecotoxicity values are obtained by multiplying the quantity (mass) of a substance by its weighting factor. A significant disadvantage of this method of calculation is that the penetration of harmful substances from atmospheric air into water and soil is neglected in this model.

The scheme in figure shows that ecotoxicity can be determined by different methods, and most importantly, it is a key indicator not only for the life cycle of building materials, but also for the study of the state of ecosystems [13].

Thus, it can be seen from the scheme that the materials themselves, as well as water and soil from life cycle sites, can be evaluated for different purposes. For all these studies, their own methods are relevant. Let us consider some of them, primarily concerning the ecotoxicity of the building materials themselves.

The dynamic leaching test determines the release of inorganic and non-volatile organic compounds from a unit surface of monolithic, slab or film building materials as a function of the duration of contact with water. The test measures and evaluates parameters such as specimen size, water quality, water volume per unit surface area of the specimen, time and temperature.

An alternative method for granular materials is the determination of upstream percolation, which takes into account the release of inorganic and non-volatile organic compounds depending on the liquid-to-solid phase ratio.

The toxicity test for freshwater algae is carried out in accordance with GOST R 54496–2011 (ISO 8692:2004)<sup>3</sup>. Determination of algal biomass is per-

<sup>3</sup> GOST R 54496–2011 (ISO 8692:2004). Water. Determination of toxicity using green freshwater unicellular algae.

Methods of research of atmospheric air, soil, surface and ground water pollution

Calculation of toxicity to humans		Calculation of the ecotoxicity index in comparative ecotoxicity units ( $CTU_e$ )	
Toxicity to humans in comparative human toxicity units ( $CTU_h$ )		Ecotoxicity to soil	Ecotoxicity to water
Substances that cause cancer	Substances that do not cause cancer	The model does not take into account the transfer of harmful substances from the atmosphere to water and soil	
Disadvantages: difficulty in accounting for synergy and biological accumulation effects; the effects of many substances need to be clarified			

Determination of ecotoxicity	
Water toxicity using green freshwater unicellular algae Toxicity by survival of freshwater crustaceans Daphnia Straus Determination of water toxicity by effects on fish eggs	Soil biomass activity level Number of pathogenic microorganisms per unit of soil mass Helminth egg content per unit of soil mass Colititre Phytotoxicity (by multiplicity) Genotoxicity (by mutation number growth compared to control samples, by multiplicity)

Determination of engineering and environmental characteristics of the territory	Biodiversity assessment
Ecological capacity of the territory Reproductive capacity of the territory Biogeochemical activity of the territory	Calculation of biodiversity indices: • Simpson index; • Shannon index
Assessment of the state of ecosystems	

Scheme of methods for determining the ecotoxicity of building materials and combining this process with other studies

formed by measuring chlorophyll fluorescence using titration microplates. With the fluorescence data available, a conversion to cell counts can be made using a correlation factor. Based on the cell counts, the growth rate and possible growth impediments are calculated compared to the control samples.

Studies on freshwater crustaceans are defined by the standard GOST R 56236–2014 (ISO 6341:2012)<sup>4</sup>. *Daphnia* are characterized by parthenogenetic reproduction, which means that further development without fertilization is possible. The sensitivity of the organisms used in the test is regularly rechecked using calcium dichromate as a reference substance. Conductivity, hydrogen index and oxygen content of the eluate are regularly monitored. During the dilution step, 5 *daphnia* aged 2–24 hours are placed in 2 vessels (total of 10 *daphnia* for each dilution step). Toxic effects on *daphnia* are assessed after one day and after two days.

The following two tests are in international standards, but are absent in domestic standards. In particular, it concerns tests of fish embryo ontogenesis<sup>5</sup> and the luminescent bacteria test<sup>6</sup>.

All the above methods relate to the assessment of fresh water condition. With regard to studies of biological indicators of soils, it should be noted that sampling, their preparation for chemical, bacteriological and helminthological analysis is carried out in strict compliance with GOST 17.4.4.02–2017<sup>7</sup>.

The key indicator of soil microbiota condition is the level of biomass (microbial) activity. The degree of severity of negative processes occurring in the microbiota is determined by the reduction of biomass activity level compared to control samples. Usually not more than 5-fold decrease in activity is considered acceptable.

According to standard methods, the sanitary-hygienic condition of the soil cover is determined by the number of pathogenic microorganisms per 1 g of soil. The colititre is the smallest mass of a soil sample, measured in grams, in which 1 bacterium coli is found. The viability of this bacterial species is highly dependent on the acidity index of soils. For example, in acidic soils (pH level from 2.9 to 3.7), the extinction of *E. coli* occurs in 7–10 days, while in neutral environments (pH level from 5.6 to 6.3) this bacterium multiplies and is active for more than 3.5 months.

<sup>4</sup> GOST R 56236–2014 (ISO 6341:2012). Water. Determination of toxicity by survival of freshwater crustaceans *Daphnia magna* Straus.

<sup>5</sup> ISO 15088:2007. Water quality. Determination of the acute toxicity of waste water to zebrafish eggs (*Danio rerio*).

<sup>6</sup> ISO 11348-2:2007. Water quality. Determination of the inhibitory effect of water samples on the light emission of *Vibrio fischeri* (Luminescent bacteria test). Part 2. Method using liquid-dried bacteria.

<sup>7</sup> GOST 17.4.4.02–2017. Nature Protection. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological and helminthological analysis.

The attenuation of bacterium coli reproduction is faster in surface soil layers, decreasing in sandy soils compared to loams. Any number of helminth eggs in 1 kg of soil indicates soil contamination.

Soil plates are the methodological basis for determining the phytotoxicity of soils and allow to record the reduction in the number of germinated seeds, height of seedlings and suppression of their growth in comparison with control specimens. The critical value of phytotoxicity, indicating a significant degree of degradation of the soil cover is a decrease in the number of seedlings more than 2 times. The indicator of soil mesofauna diversity also characterizes the ecological state of soils. Counting of invertebrates is carried out on a grid with a side length of 10 cm with repetition 2 times to the depth of occurrence of mesofauna representatives.

Genotoxicity studies are a more complex study of mutagens compared to control samples. In soils that have undergone serious changes, an increase in the number of mutations by more than 1,000 times is observed.

Biodiversity indicators are also important. In particular, it can be Simpson and Shannon indices. For example, to assess the life cycle of crop-based biofuels [14].

The choice of materials is related to the variety of basic raw materials and material applications.

## RESEARCH RESULTS

The methods used were not only concerned with the materials themselves, but also with the components of the geosphere (in particular, the soil cover) at the locations of the life cycle stages of these materials. What is interesting is the attempt to compare the results of these two lines of research. A direct correlation is hardly possible with this approach, but a general assessment of the life cycle can be made with a certain degree of accuracy. A difficulty in realizing the comparative analysis was the slightly different testing times and different environments. For ecotoxicity, the materials themselves were used, and for life cycle assessment, soil samples from sites associated with their life cycle were used. The results of the studies are summarized in Table 1.

It can be concluded from Table 1 that materials containing polymeric components show more serious problems with ecotoxicity. At the same time, one of the indicators that reflects the environmental loads over the life cycle of a material is the multiplicity of reduction in the biomass activity level (see its variation for inorganic materials). In the following, it is proposed to consider some of the toxic substances that may be present in the materials considered.

Fluoride was isolated from epoxy resin-based polymer concrete as well as from expanded glass gravel in varying amounts (from 0.1 to 1.1 mg/litre). Also the polymer concrete based on epoxy resin and the foam glass gravels contain chloride (amounts ranging from 1 to 27 mg/litre). Different amounts of sulphate ranging from 1 to 6.8 mg/litre are contained in materials such as roofing membranes, polymer concrete and expanded

**Table 1.** Ecotoxicity indicators for water and soil of some construction materials

Name of building material	pH	Water-weed test	Daphnia test	Fish roe	Soil indicators by life cycle (worst indicators)	
					Biomass activity level (multiplicity of reduction)	Phytotoxicity (multiplicity)
Polymer concrete based on epoxy resin: • percolation; • dynamic leaching test	9.6–9.7 9.3–9.5	2,987 531	526 89	34 11	4.3	1.1
Foam glass gravel	9.6–9.8	5	≤ 2	≤ 2	1.3	1
Expanded claycrete	9.5–9.7	≤ 2	≤ 2	≤ 2	1.5	1.0
Cement-based aerated concrete	9.7–10.0	3	≤ 2	≤ 2	1.7	1.11
Polystyrene foam: • percolation; • dynamic leaching test	6.2–7.5	3,761 678	632 98	42 21	4.9	1.13
Polyurethane foam board: • percolation; • dynamic leaching test	6.2–7.5	3,997 712	679 114	53 26	5.1	1.18
Polyisobutylene roofing membrane	6.2–7.2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	3.6	1.05
Roofing membrane made of ethylene propylene diene monomer (EPDM)	5.6–8.1	5	≤ 2	≤ 2	2.2	1

glass gravel. In the case of roofing membranes, elevated values of zinc (40 to 100 mg/litre), calcium (0.6 to 2 mg/litre) were found as cations. Cations of sulphur, sodium, potassium, magnesium, calcium, silicon, zinc, strontium, copper, manganese, boron, arsenic, aluminium, molybdenum, cobalt, vanadium were also found in the eluates of epoxy resin-based polymer concrete.

The presence of a substance such as hexabromocyclododecane (HBCD), which is used as a flame retardant, is particularly important for polystyrene foams. This substance and fluorinated hydrocarbons are dangerous from a toxicological point of view. HBCD is nowadays less and less used in the production of foams, as it is stable in the environment, capable of biological accumulation, which should be taken into account in the disposal (recycling) of products. In particular, it is destroyed by solvolysis or other methods (e.g., high temperatures) [15, 16].

In addition to the determination of ecotoxicity by various tests involving living organisms, it is worth considering calculated methods for determining ecotoxicity and toxicity to humans using the above formulae.

The results of the determination of parameters for different building materials are given in Table 2.

When comparing data on different building materials (functional unit — 1 kg), also all 3 indicators (cancer toxicity, non-cancer toxicity and ecotoxicity) correlate well with each other. In general, from the data in Table 2, it can be concluded that there is a good convergence of the results of the study with the data obtained by foreign experts. However, almost all parameters of toxicity (ecological and for humans) in the study are somewhat higher, which should be justified by some peculiarities of the domestic life cycle of all considered materials. The obtained information can be included in environmental declarations and used for life cycle assessment. The shortcomings that should be worked on in the future include the need for more detailed consideration of each of the life cycle stages in order not to miss important information; standardization of methods for calculating indicators, including by working on calculation programmes, and the formation of databases on human and ecotoxicity indicators are also recommended.

**Table 2.** Estimated human toxicity and ecotoxicity for different building materials

Name of building material	Results according to sources [17, 18]			Results of the study		
	Toxicity to humans, CTU <sub>h</sub>		Ecotoxicity, CTU <sub>e</sub>	Toxicity to humans, CTU <sub>h</sub>		Ecotoxicity, CTU <sub>e</sub>
	cancerigenic	not cancerigenic		cancerigenic	not cancerigenic	
Aluminium alloy frames	2.19E-05	3.64E-04	421,838.75	2.17E-05	3.72E-04	445,724.52
Steel frames	1.67E-08	4.24E-08	47	1.72E-08	4.33E-08	54
PVC frames	2.43E-05	1.39E-04	183,431.25	2.51E-05	1.44E-04	191,223.31
FPU foam	2.06E-09	1.12E-07	303.64	2.11E-09	1.18E-07	311.58
Stone wool	5.1E-09	1.2E-08	30.24	4.97E-09	1.13E-08	28.57

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The study of the ecotoxicity of building materials is of interest for the identification and assessment of the release of harmful substances from the materials themselves, as well as at sites associated with their life cycle. A definite advantage of using the ecotoxicity category is the response of living organisms to the ingestion of harmful substances, which is assessed both in the analysis of material eluates and in environmental elements (e.g. soil). This is a much more comprehensive characterization of the situation than simply determining the amount of a particular harmful substance. With the help of ecotoxicity determination it is possible to clarify which building materials are worth investigating with exhaustive chemical analytics. With this approach (first ecotoxicity determination, then chemical analytics and identification of harmful substances), costly studies can be saved. Thus, the biological assessment approach does not contradict the chemical analytical approach at all, but is merely a supporting component and complement. The total time required for ecotoxicity studies of eluates (their effect on algae, daphnia or luminescent bacteria) ranges from one day to one and a half days. In this case, if toxicity values are elevated, the tests can be terminated with appropriate conclusions. Further testing can be continued for another day if necessary (e.g. experiments with fish embryos). Soil tests are more time consuming, but in some cases give more accurate results (e.g. multiplicity of biomass activity levels). Sample preparation, measurement and data evaluation should be included in the time required for research. It should be noted that there are sometimes large fluctuations from sample to sample, which requires careful interpretation of the results. In terms of time, the determination of ecotoxicity is quite comparable to studies of construction materials using chemical-analytical methods [4, 19, 20].

The category and results of ecotoxicity assessment are easier to incorporate into the life cycle compared to biogeocoenosis parameters in locations related to the life cycle of construction materials, including for reasons of calculation per specific functional unit. However, biodiversity assessment through the life cycle of materials is beginning to play a key role at the present stage. For these studies, ecotoxicity tests also play an important role as they help to understand at a qualitative and quantitative level the toxic compounds present in the life cycle of building materials.

Methods for determining ecotoxicity require careful consideration of some important issues, which may include the following:

- the difference in sensitivity of the organisms used in the tests;
- comparing the results of percolation and dynamic leaching tests gives the most accurate results and excludes inadequate conclusions;
- accuracy of interpretation of the results obtained and comparison of different methods of ecotoxicity determination.

An important direction is to study the correlation of the category of ecotoxicity with the category of toxicity to humans, as well as with other life cycle parameters (greenhouse effect potential, acidity increase, eutrophication, ozone depletion potential, photo-oxidant formation potential), as well as with such parameters as engineering-ecological characteristics (ecological capacity, reproductive capacity), bioindication indicators, biodiversity indices.

Current areas of research are the development of software systems such as GABi, SimaPro, Ecoinvent, and USEtox, which allow the calculation of life cycle ecotoxicity indicators in automatic mode. It is also worth paying attention to improving the regulatory framework. In particular, it concerns some standards for water quality control by methods of ecotoxicity determination.

## REFERENCES

1. Gruzdev V.S. *Bioindication of environmental conditions. Ser. Nauchnaya mysl'*. Moscow. INFRA-M Publ., 2018; 160. DOI: 10.12737/monography\_5a6f02e2738690.08466285 (rus.).
2. Lindner J.P., Eberle U., Schmincke E., Luick R. et al. Biodiversität in Ökobilanzen. Abschlussbericht des F+E-Vorhabens "Weiterentwicklung der Ökobilanzen durch Integration der Biodiversitätsauswirkungen von Produkten" (FKZ 3511 82 3100). *Bundesamt für Naturschutz*. Bonn – Bad Godesberg, 2019; 242. DOI: 10.19217/skr528
3. *Toxicity of Building materials*. Ed. by F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, A. Fucic. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Dehli, Woodhead Publishing, 2012; 486.
4. Heisterkamp I., Gartiser S., Kretschmar M., Schoknecht U. et al. *Methoden und Kriterien zur Bewertung der Ökotoxizität von Produkten*. Dessau-Rosslau, Umweltbundesamt, 2022; 135.
5. Kobeticova K., Černý R. Ecotoxicology of building materials : a critical review of recent studies. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 165. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.161
6. Pacheco-Torgal F., Jalali S. Toxicity of building materials: a key issue in sustainable construction. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2011. DOI: 10.1080/19397038.2011.569583
7. Rodrigues P., Silvestre J.D., Flores-Colen I., Viegas C.A., de Brito j., Kurad R. et al. Methodology for the Assessment of the Ecotoxicological Potential

of Construction Materials. *Materials*. 2017; 10(6):649. DOI: 10.3390/ma10060649

8. Pacheco-Torgal F. Introduction to advances in the toxicity of construction and building materials. *Advances in the Toxicity of Construction and Building Materials*. 2022; 1-7. DOI: 10.1016/B978-0-12-824533-0.00009-8

9. Mötzl H., Zelger T. *Ökologie der Dämmstoffe. Grundlagen der Wärmedämmung. Lebenszyklusanalyse von Wärmedämmstoffen. Optimale Dämmstandards*. Wien, Springer-Verlag, 2000; 195.

10. Jungbluth N. *Bewertungsmethoden in der Ökobilanzierung*. Schaffhausen, ESU-services GmbH, 2023; 31.

11. Fantke P., Bijster M., Guignard C., Hauschild M., Huijbregts M., Jolliet O., et al. *USEtox® 2.0 Documentation (Version 1)*. 2017. DOI: 10.11581/DTU:00000011

12. Wielandt Egemose C., Bastien D., Frette X., Birkved M., Sohn J.L. Human toxicological impacts in life cycle assessment of circular economy of the built environment: A case study of denmark. *Buildings*. 2022; 12(2):130. DOI: 10.3390/buildings12020130

13. Zhuk P.M., Lavrusevich A.A. Geoecological aspects of life cycle analysis of building materials. *Vestnik PNIPU. Prikladnaya ehkologiya. Urbanistika*. 2020; 3:99-111. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.03.09 (rus.).

14. Urban B., Von Haaren C., Kanning H., Krahl J., Munack A. Spatially differentiated examination of Biodiversity in LCA (Life Cycle Assessment) on national scale exemplified by biofuels. *Landbauforschung Volkenrode*. 2012; 62(3).

15. Zhukov A.D., Zhuk P.M., Stepina I.V. Assessment of the environmental impact on the life cycle of polystyrene thermal insulation materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022; 2388:012101. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012101

16. Zhuk P.M. Assessment of environmental impacts of the life cycle of polyurethane foam thermal insulation in construction. *AVOK: Ventilyaciya, otopenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika*. 2023; 7:48-51. (rus.).

17. Rey-Álvarez B., Silvestre J., Garsía-Martínes A., Sanches-Montañés B. A comparative approach to evaluate the toxicity of building materials through life cycle assessment. *Science of The Total Environment*, 2023; 26(912):168897. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168897

18. Rey-Álvarez B., Sanches-Montañés B., Garsía-Martínes A. Building material toxicity and life cycle assessment: A systematic critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 341:130838. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130838

19. Heisterkamp I., Gartiser S., Schoknecht U., Happel O., Kalbe U., Kretzschmar M. et al. Investigating the ecotoxicity of construction product eluates as multicomponent mixtures. *Environmental Sciences Europe*. 2023; 3. DOI: 10.1186/s12302-023-00711-w

20. Bandow N., Gartiser S., Ilvonen O., Schoknecht U. Evaluation of the impact of construction products on the environment by leaching of possibly hazardous substances. *Environmental Sciences Europe*. 2018; 30:14. DOI: 10.1186/s12302-018-0144-2

Received November 27, 2023.

Adopted in revised form on December 8, 2023.

Approved for publication on December 8, 2023.

**B I O N O T E S :** Petr M. Zhuk — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean Faculty of Bachelor Degree; Moscow Institute of Architecture (State Academy) (MARKHI); Rozhdestvenka 11/4, bldg. 1, page 4, Moscow, 107031, Russian Federation; SPIN-code: 2547-0781, ORCID: 0000-0001-6257-4710; peter\_05@bk.ru.