

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 539.3; 539.42

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>

Оригинальная статья

### Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики

В. В. Лепов<sup>✉,1</sup>, С. М. Бисонг<sup>2</sup>, Р. Н. Голых<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,  
г. Якутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Университет Дчанга, Университет Дуаля, Камерун

<sup>3</sup>Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
г. Барнаул, Российская Федерация

<sup>4</sup>Бийский технологический институт (филиал), г. Бийск, Российская Федерация

✉ wisecold@mail.ru

#### Аннотация

Представлен краткий обзор исследований в области многомасштабного моделирования процессов разрушения материалов с микроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики. Ряд модельных задач рассматривается с точки зрения макроскопической прочности и роста магистральной трещины путем накопления микроскопических дефектов, реализации иерархических процессов разрушения по механизму образования, роста и слияния микротрещин и микропор. Так, для процесса разрушения образцов из пористого бетона, модифицированного органическими волокнами для повышения его потребительских качеств, проведено моделирование роста трещин, которое показало снижение трещиностойкости материала с ростом содержания фибры. Для оценки изгибной прочности и модуля упругости использовались испытания на трехточечный изгиб, также определены прочность и модуль упругости на сжатие. Увеличение концентрации волокон приводит к уменьшению предела прочности и модуля упругости на сжатие. Анализ поверхности изломов позволил выявить механизм распространения трещин путем коалесценции микропор на волокнах. Основой моделирования являлся экспериментально обоснованный критерий концентрационного разрушения при образовании трещин, основанный на теории перколяции. Также осуществлено многоуровневое моделирование – макроскопическое конечно-элементное и стохастическое на микро- и мезомасштабе - разрушения при изгибе балки из дерева. Особенностью деревянных конструкций является анизотропия поведения материала к направлению нагрузки. Учитывалась микроструктура дерева *Bilinga*, для древесины которой построена иерархия пространственных и временных масштабов процесса. Определены скорости роста трещины на различных масштабах, которые сопоставлены с макроскопическим расчетом. Еще одна задача – определение зависимости скорости трещины в плотном грунте при воздействии ультразвукового ударника при отсутствии влаги. С помощью стохастического моделирования роста трещины в массиве микропор выявлена зависимость скорости разрушения от параметров ультразвукового воздействия и амплитуды импульсов.

**Ключевые слова:** прочность, многоуровневое моделирование, изгиб, разрушение, трещина, КЭ-моделирование, стохастическое моделирование, модифицированный бетон, пористость, прочность древесины, разрушение грунта, ультразвуковое бурение

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект FWRS-2021-0039) и Российского фонда фундаментальных исследований и Государственного фонда естественных наук Китая (проект 21-52-53036) в части моделирования процесса разрушения грунта, с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН, проект №13.ЦКП.21.0016.

**Для цитирования:** Лепов В.В., Бисонг С.М., Голых Р.Н. Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):156–171. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>

## Foundation of multilevel approach to fracture modeling for materials with submicrostructure applicable for Arctic and Subarctic environment

V. V. Lepov<sup>✉,1</sup>, S. M. Bisong<sup>2</sup>, R. N. Golykh<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>LMMSP University of Dschang, ENSET Douala, Cameroon

<sup>3</sup>Polzunov I.I. Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

<sup>4</sup>Biysk Technological Institute (branch), Biysk, Russian Federation

✉wisecold@mail.ru

### Abstract

A short review of research on multiscale modeling of the fracture processes of heterogeneous materials with submicrostructures applicable to Arctic and Subarctic environments is presented. The results of solving a number of model problems, both in terms of macroscopic strength and main crack growth, and describing the accumulation of microscopic defects and hierarchical fracture processes by the mechanisms of formation, growth, and fusion of secondary and microcracks, and microscopic pores are provided. Thus, for the fracture process of samples of porous concrete modified with oil palm fruit fibers to improve its consumer qualities, a simulation of crack growth was conducted, which showed a decrease in the crack resistance of the material with increasing fiber content. A three-point bend test was used to evaluate the bending strength and modulus of elasticity, and the compressive strength and modulus of elasticity were determined. An increase in the fiber content led to a decrease in the compressive strength and modulus of elasticity. The fracture surface analysis revealed the mechanism of crack propagation through the coalescence of micropores. The basis of the modeling was an experimentally substantiated criterion for concentrated fractures during crack formation based on percolation theory. Macroscopic finite-element and stochastic modeling of fractures during the bending of a beam made of wood have also been carried out. For wooden structures, the peculiarity is the anisotropic behavior of the material in the loading direction. The structure of the Bilinga tree timber at the mesoscopic and microscale levels was considered, and a hierarchy of the spatial and temporal scales of the fracture process was constructed. The crack growth rates at different scales were determined and compared with macroscopic FE simulations. Another task was to determine the dependence of the crack growth rate in the soil, such as regolith, under the influence of an ultrasonic impactor. Stochastic modeling of the crack growth in the array of micropores revealed the crack growth rate dependence on the ultrasonic transmitter beater parameters and pulse amplitude.

**Keywords:** strength, multilevel modeling, bending, fracture, crack, finite element modeling, stochastic modeling, modified concrete, porosity, wood strength, ground disintegration, ultrasonic drilling

**Funding.** This study was supported by the Program of Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences (project number FWRS-2021-0039) and the Russian Foundation for Basic Research and the State Fund of Natural Sciences of China (project number 21-52-53036) in terms of modeling the process of soil destruction using the equipment of the Core Shared Research Facility (CSRF) of the FRC YaSc SB RAS (project number 13.CSRF.21.0016).

**For citation:** Lepov V.V., Bisong S.M., Golykh R.N. Foundation of multilevel approach to fracture modeling for materials with submicrostructure applicable for Arctic and Subarctic environment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):156–171. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>

### Введение

Многомасштабные методы численного моделирования [1–4] стали широко применяться как инструмент оперирования на нескольких масштабах и позволили уменьшить степени свободы на основе организации локальных автономных вычислений. С другой стороны, эти методы позволяют получить строгие макроскопические уравнения для многомасштабных задач без разделения процессов их решения и строгих гра-

ничных условий. Сама концепция многомасштабного моделирования появилась в последние десятилетия для описания механического, физического или химического поведения на уровне сплошного тела по данным, получаемым из численных моделей на более тонких масштабных уровнях в системе, не прибегая к эмпирическим конститутивным моделям. Было разработано большое количество методов, использующих множество подходов для

связывания пространственных и временных шкал [5–7].

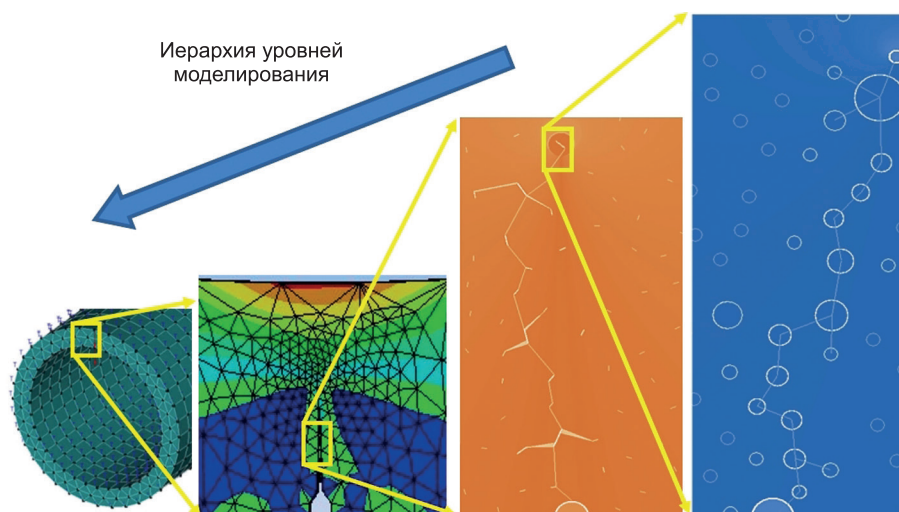
Одной из ключевых концепций многомасштабного моделирования в последние годы является применение различных методов сокращения сложности таких моделей, в частности, применением специальных численных методов. Однако следует сделать некоторые терминологические замечания. *Многоуровневый* подход применяется в системном анализе, и связан с понятием *уровней* (не обязательно четко разграниченных по масштабам пространства или времени) *системы* (от греч. целое, составленное из частей; соединение), или совокупности элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство. В данной работе имеется в виду сложная техническая система (СТС), или человеко-машинная система (ЧМС), например, транспортная, состоящая из трубопроводов, насосных станций, резервуаров, операторов и т. д.

Хотя линейная механика разрушения (ЛМР) рассматривает только сплошные твердые тела и не предусматривает рассмотрение иерархии структурных уровней в системах; даже для упрощенного описания кинетики трещин и разрушения неоднородных систем с внутренней микроструктурой и фазовыми переходами необходимо введение многомасштабного рассмотрения (рис. 1).

Отсюда видны и различия методов многомасштабного моделирования и системно-структурного многоуровневого подхода. Многоуровневый подход позволяет обосновать иерархию моделей, облегчающих анализ и разработку новых технических и человеко-машинных систем, менее подверженных неблагоприятным факторам окружающей среды, а также позволяющим, насколько это возможно, обеспечить целостность и ресурс, работоспособность и безопасность СТС в условиях глобального изменения климата и возрастания роли человеческого фактора.

Построение теоретических, математических и численных моделей процессов образования и роста трещин, разрушения материалов с целью оценки и прогноза их длительной прочности, а также надежности и ресурса изделий из них, эксплуатирующихся в том числе и в экстремальных климатических условиях, требует знания структуры и механизмов накопления повреждений на различных масштабных уровнях.

Хотя в последние десятилетия наибольшее распространение получили КЭ-модели макроскопического уровня, наглядно демонстрирующие процессы, происходящие при деформировании и разрушении образцов, деталей и узлов [8–10], а также специализированные конечно-разностные модели, в основном теплофизических и мультифизических процессов [11–13], их основными



**Рис. 1.** Уровни моделирования разрушения материалов: *a* – КЭ-модель стенки нагруженной трубы на уровне детали (~0,1 м); *б* – КЭ-модель роста магистральной трещины на макроуровне (~0,01 м); *в* – стохастическая модель роста основной трещины на мезоуровне (~0,1 мм); *г* – стохастическая модель слияния микропор на микроуровне (~1÷10 мкм)

**Fig. 1.** Hierarchy of the multilevel modeling scales of materials: *a*) FE-model of the loaded pipe wall (~0.1 m); *б*) FE-model of the main crack growth on macroscale (~1 cm); *в*) stochastic model of main crack grows on mesoscale (0.1 mm); *г*) on microscale (1–10 μm)

недостатками остаются трудоемкость учета реальной структуры материалов, границ разделов, фазовых переходов, проблемы пересчета всей сетки при изменении формы образца.

Поэтому в ряде случаев представляется оправданным применение дискретных стохастических моделей [14–17], основанных либо на тех же фундаментальных закономерностях, либо на их дискретных аналогах с учетом достоверно установленных статистических распределений. При этом структура материала естественным образом входит в основу расчета. В основном такие модели применяются на мезо- и микроскопическом структурных уровнях [14, 15, 17], на масштабе вершины магистральной трещины [16], вторичных микротрещин, микропор и дислокаций [14].

Цель настоящей работы заключалась в построении общего алгоритма и решении задач многоуровневого моделирования процессов разрушения материалов на основе анализа структуры и выявления закономерностей развития дефектов в таких материалах, как модифицированный органическим наполнителем пористый бетон, древесина Билинга и лунный грунт (реголит).

Модифицированный органическими наполнителями бетон находит применение в строительстве различных сооружений, включая фундаменты и стены жилых зданий. Несмотря на снижение прочностных свойств, в ряде случаев повышаются демпфирующие, теплофизические и звукоизолирующие свойства бетона, что увеличивает сферу применения его для сейсмоопасных районов и регионов с экстремальным климатом.

Древесина Билинга используется для изготовления строганого шпона, внутренних и наружных облицовочных панелей, столярных изделий, шпал, столбов, столярных и свайных конструкций причалов, пристаней, платформ, подоконников, различной мебели и паркета. Используется для декоративной отделки интерьеров и экстерьеров помещений, террас и садовых объектов; отлично подходит для покрытия полов в жилых и производственных помещениях, транспортных средствах и контейнерах. Благодаря высокому содержанию танина и натурального масла в древесине, плотное дерево устойчиво к самым разным погодным и климатическим условиям, солнечному свету и морской воде, низкой и высокой температуре. Именно поэтому оно отлично подходит для строительства мостов и морских судов, особенно плашкоутов барж и их палуб.

Увеличение внимания к исследованию других планет и малых небесных тел вызывается

перспективами исчерпания земных минеральных ресурсов и планируемому освоению человеческой цивилизации космического пространства, в частности, Солнечной системы и других звездных систем согласно концепции глобального эволюционизма В.И. Вернадского и К.Э. Циолковского. Для этого необходимы изучение свойств грунтов других планет и создание средств их переработки и использования.

### **1. Фундаментальные принципы, лежащие в основе многоуровневого моделирования материалов с изменяющейся микроструктурой и фазовыми переходами**

Принцип многоуровневости позволяет исследовать иерархии связей структурных компонентов системы, подразделяя их по критериям вложенности на высший, средний и низший уровни управления системой, при этом свойства системы будут разделяться на общие, особенные и единичные (уникальные для системы). Структура системы будет определяться связями подсистем, частей и других элементов системы, таких как фазовый состав и вещество. При применении принципа многоуровневости на первом уровне описываются внутренние качества и свойства системы, а также те признаки, которые выделяют данную систему среди других, внутренние источники развития системы и свойства исследуемой системы как части более сложной системы. Для систем более высокого порядка характерно то, что они не имеют никакого отношения к свойствам, организации и структуре систем более низкого порядка, однако вбирают в себя свойства этих, являясь внешними по отношению к ним.

Создание новых материалов всегда представляло собой трудную задачу, связанную с решением ряда комплексных междисциплинарных задач. Различными принципами руководствуются химия и материаловедение, черная и цветная металлургия, нанотехнологическая отрасль, однако общими остаются фундаментальные физические законы, обуславливающие предельные характеристики и оптимальные соотношения свойств конструкционных и функциональных материалов. В настоящее время мир поставлен перед необходимостью решения ряда насущных вопросов, связанных с безопасностью создаваемых и уже используемых в сложных технических системах материалов, включая энергетические комплексы и протяженные транспортные системы, в том

числе предназначенные для экстремальных климатических условий Севера и Арктики. Анализ этих факторов с позиций современного состояния фундаментальной науки приводит к обоснованию системно-структурного подхода к проектированию и созданию материалов, предназначенных для экстремальных условий эксплуатации [18].

Кроме известных механических и физико-химических принципов создания материалов [19, 20], в связи с развитием новых возможностей компьютерного конструирования, молекулярных и квантовых технологий большое значение приобретают идеи системно-структурного подхода [21], базирующегося на наиболее общих экстремальных принципах, теореме Нётер, синергетике, теории динамического хаоса и теории фазовых переходов.

В то же время в рамках развиваемой концепции 4-й промышленной революции во всем мире для создания новых материалов активно используются принципы машинного обучения как технологии искусственного интеллекта [22, 23].

Хотя последние представляются весьма перспективными для ряда специальных задач, таких как ускоренное построение эмпирических регрессионных зависимостей, оптимизация испытаний, классификация и кластеризация, а также оценка вероятностей для разработки новых составов оксидных соединений, композиционных материалов, электролитов, некоторых металлических сплавов сложного состава, что позволяет разрабатывать материалы с заранее заданным комплексом свойств как макроскопического, так и микроскопического масштаба, исходя из их структуры [24], однако теоретической основой этих методов остаются знания, базирующиеся на фундаментальных принципах, и соответствующие методические подходы. Без них развитие каких-либо технологий искусственного интеллекта не представляется возможным.

Первым из применяемых физических законов и закономерностей следует упомянуть принцип относительности Галилео Галилея. Он касается относительности инерциальных систем отсчета, в механике он относится к динамике системы, их кинетике, скоростям протекания различных процессов на подуровнях какой-либо системы. Возникает многомасштабность процессов (деформации, разрушения и т. д.) не только по объему пространства, но и по времени протекания. Для процессов требуется вводить иерархию не только характерных структурных размеров, но и времени протекания, скоростей реакций и т.д. [25].

## **2. Материалы и оборудование**

Для испытаний образцов из бетона с органическим наполнителем, твердого дерева, кирпича применялось стандартное механическое оборудование с использованием видеозаписи. Такие материалы, как бетон и дерево, могут применяться в широком климатическом диапазоне, включая регионы Арктики. Оценка структурных составляющих производилась металлофизическими методами, анализом морфологии изломов, в частности, с помощью оптического микроскопа «Неофот», электронных растрового «Hitachi TM-3030» и мультимикроскопа СММ-2000.

Характеристики дефектной микроструктуры: размеры, регулярность расположения дефектов и расстояние между ними, выявляются методами морфологического анализа, применяемыми в оптической фрактографии, электронной микроскопии, профилометрии, с использованием, например, сканирующих атомно-силовых и туннельных микроскопов [26].

Судя по микроструктуре поверхности разрушения пористого бетона с органическим наполнителем, характер разрушения вязко-хрупкий, а осуществляется оно по механизму роста и слияния микропор [27, 28].

Смесь для модификации бетона, используемая в работе, был получена вручную, следуя методике, разработанной в Камеруне [29]. Смесь скорлупы разбитых орехов и покрывающей ее фибры масличной пальмы была собрана на маслобойне в г. Кумба, Камерун. После сбора смеси она была промыта чистой водой, затем скорлупа отделена от волокон. Затем фибра проваривалась в растворе 2 %-й NaOH в течение 15 минут, промывалась чистой водой до исчезновения пены и высушивалась в течение двух дней.

Для того чтобы получить оптимальное соотношение волокон в композите, использовалось определенное количество цемента и воды и варьировалось только количество фибры по отношению к количеству песка (доля песка снижалась по объему с эквивалентной заменой органическим волокном). Количество ОПМФ для использования в данной работе варьировалось от 0 до 1,5 % объема песка. Состав образцов с различным содержанием фибры представлен в табл. 1.

После составления смеси она помещалась в формы для изготовления образцов. Испытание на трехточечный изгиб проводилось в соответ-

ствии со стандартом для бетонных конструкций следующим образом:

– Образцы имели призматическую форму и размер 40×40×160 мм.

– Расстояние между двумя точками опоры составляло 140 мм, образец располагался горизонтально, сила прикладывалась к центральной линии контакта с постоянной скоростью до разрушения образца.

– Сила, приложенная к образцу, регистрировалась на индикаторе штампа, установленном на верхнем нагрузочном пролете, смещение внутри образца – на индикаторе штампа, установленном на нижнем опорном пролете. Получены значения силы и смещения для вычисления предела прочности и модуля упругости на изгиб. Предел прочности и модуль Юнга на изгиб вычислялись для 7-, 28- и 45-дневных образцов из модифицированного бетона.

Прочность на изгиб увеличивается при росте содержания фибры до 0,25 %, однако при дальнейшем росте доли модификатора падает. Прочность на изгиб 45-дневного образца увеличилась с 4,39 до 5,47 МПа, а снизилась до 2,51 МПа. Таким образом, добавление небольшого количества волокна увеличивает прочность смеси из-за дополнительного поглощения фиброй воды и цементации, но в дальнейшем матрице уже не хватает воды.

Модуль упругости при изгибе также увеличивается при малом содержании фибры и падает при высоком.

Для определения прочности на сжатие использовались образцы кубической формы 40 × 40 × 40 мм. Избыточная вода высушивалась перед помещением в нагружающее устройство испытательной машины. Образец нагружался с постоянной скоростью до разрушения. Сила фиксировалась динамическим компаратором в верхней части нагружающего устройства, а смещение внутри образца записывалось на матричном индикаторе, установленном на нижней части опоры. По видеоизображению были сняты показания для оценки силы и смещения.

По стандартным соотношениям механики были получены значения предела прочности и модуля упругости на сжатие. Прочность на сжатие уменьшается с увеличением количества волокон с 21,38 до 6,94 МПа. Это можно объяснить тем, что увеличение количества волокон приводит к увеличению объема зерна. Кроме того, фибра быстро впитывает воду, и цемент не успевает в достаточной мере гидратировать, что при-

Таблица 1

**Весовой состав материалов, используемых для смеси, кг**

Table 1

**Weight content of materials for the mixture, kg**

Номер смеси, содержание фибры, %	Цемент	Песок	Фибра	Вода
S1 = 0	383,04	1702,4	0	229,824
S2 = 0.25	383,04	1698,144	3,37288	229,824
S3 = 0.5	383,04	1693,888	6,74576	229,824
S4 = 0.75	383,04	1689,632	10,11864	229,824
S5 = 1	383,04	1685,376	13,49152	229,824
S6 = 1.25	383,04	1681,12	16,8644	229,824
S7 = 1.5	383,04	1676,864	20,23728	229,824

водит к слабому сцеплению смеси, уменьшению сплошности материала и падению прочности композита на сжатие. Модуль упругости также уменьшается с увеличением количества волокон, с 310 до 108 МПа, поскольку увеличение количества волокон приводит к уменьшению количества воды в смеси, поэтому растет пористость и увеличивается хрупкость.

Механическое поведение древесины высокой плотности (лиственница, Билинга, дуб и др.) представляет высокий интерес для строительства в различных регионах страны и мира, поскольку прочность ее практически не меняется в широком диапазоне температур. Так, образцы дерева Билинга, растущего в юго-западных регионах Камеруна, исследованы на механическое поведение при изгибе. Применены испытания на трехточечный изгиб. Моделирование напряженно-деформированного состояния и роста трещины на макроскопическом уровне осуществлено на программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench 2020 R1, с использованием технологии Smart Crack Growth, введенной в версию 2019. Стохастическое моделирование роста трещин на мезо- и микроуровне использовалось для сравнения скорости роста трещин в случае подхода гетерогенного материала и с учетом механизма микроструктуры и разрушения древесины.

Древесина дерева Билинга по прочности и твердости превосходит древесину дуба, кроме устойчивости к ударным нагрузкам. Ее плотность при стандартной влажности составляет от 740 кг/м<sup>3</sup> до 810 кг/м<sup>3</sup> (табл. 2). Билинга, как и

## Физические и механические свойства древесины (при 13%-й влажности)

## Physical and mechanical properties of wood (at 13 % water content)

Название дерева	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Твердость Моннина (тангенц.), МПа	Предел прочности, МПа			Модуль упругости на изгиб, МПа	Скорость звука (вдоль), м/с	Коэффициент поперечного сжатия
			сжатие	растяжение (вдоль)	изгиб			
Билинга	760	53	63,0	100	90	11 800	8,8	0,41
Лиственница	680	27,8	55,0	123	97	13 200	1,45	0,45
Сосна	530	22,3	44,0	101	79	10 200	1,17	0,49
Дуб	760	56,8	52,0	–	93	15 400	1,40	0,43
Граб	810	71,7	60,0	135	121	–	–	–
Берёза	640	35,0	45,0	161	100	15 400	1,50	0,58
Акация	830	71,0	77,5	–	71	–	–	–
Амарант	880	50,0	–	–	50	–	–	–
Эбен	1050	>80,0	–	–	80	–	–	–

лиственница, обладает высокой водо- и огнестойкостью, поэтому подходит для использования в различных диапазонах температур и влажности и считается одной из самых устойчивых из существующих пород, так как практически не подвержена нападением насекомых, термитов и даже морских моллюсков и хорошо противостоит появлению грибов.

Машина INSTRON 200 кН для испытания на трехточечный изгиб оснащалась камерой, которая фиксировала внешний вид изломов и место излома. Универсальные гидравлические захваты с набором клиновых элементов использовались для проведения испытаний на изгиб, сжатие и т. д. Рама высокой жесткости с минимальным прогибом при максимальной нагрузке (0,9 мм). Перемещение рамы до 110 мм.

Для измерения массы образцов, содержания влаги использовались электронные весы с максимальным диапазоном 0,006–5,1 кг, точностью 1 мг. Для сушки древесины использовалась печь мощностью 2,0–2,2 кВт/ч.

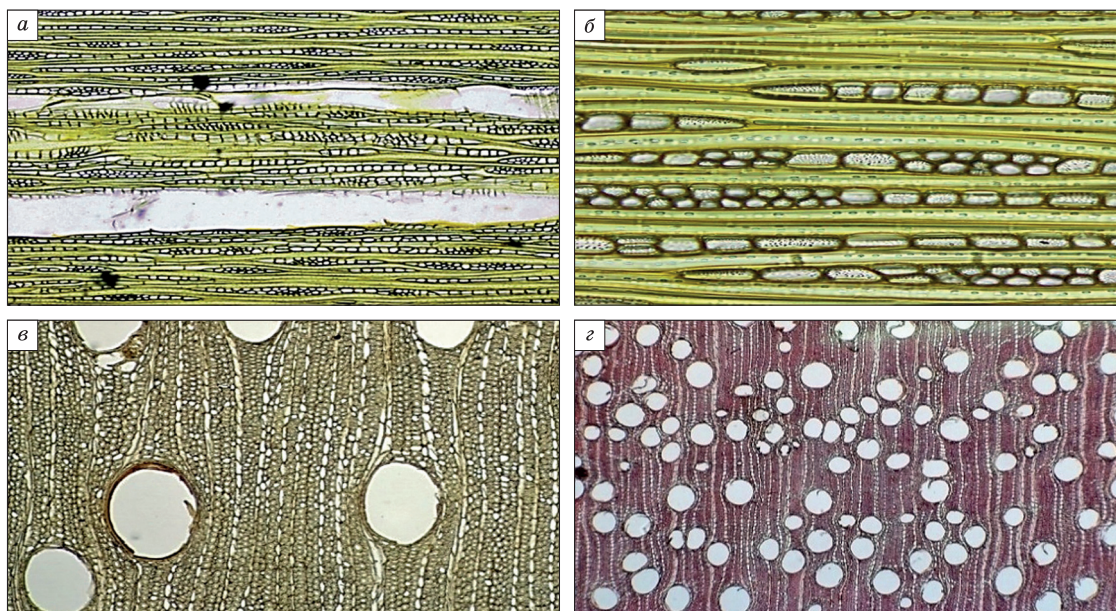
В исследовании изучены образцы содержанием влаги в сухой водной печи и сухой водной печи 14 %. Испытания проводились на 10 образцах (20 × 20 × 360 мм). Определялись модуль упругости при изгибе  $E_f$  (МПа) и скорость высвобождения энергии  $G$ . Целью испытания на изгиб поставлена оценка разрушающей нагрузки для деревянной балки, находящейся на двух опорах с центральной нагрузкой при скорости около 2 мм/мин.

Для стохастического моделирования на микро- и мезомасштабном уровне использовались количественные данные о структуре, полученные из исследованных микросрезов древесины Билинга (рис. 2).

Задача для грунта (лунный реголит) также решалась методами механики разрушения, а исходные данные брались из экспериментальных исследований, которым соответствовали следующие условия: поры размер 50–100 мкм расположены с минимальным разбросом по нормальному закону, рост трещины происходит путем роста и слияния микротрещин в окрестностях таких пор. Ориентация микротрещин случайная, а среднее расстояние между порами составляет 100–150 мкм. Начальная магистральная трещина может иметь длину до 1 мм.

Для обоснованного моделирования таких хрупких пористых пород с механическими характеристиками, сильно зависящими от влажности, необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования [30]. Однако в ряде случаев модель может быть применена и для разрушения хрупких тел с трещинами или порами при нулевой влажности, например, как для задач оценки свойств грунта с помощью ультразвукового воздействия, в том числе в открытом космосе [31, 32].

Для ультразвукового излучателя, имеющего внедряющийся в грунт плоский ударник, коэффициент интенсивности напряжений:  $K_I = P_N \sqrt{l} \cdot f(\alpha)$ , где  $P_N$  = среднее (номинальное) напряжение в



**Рис. 2.** Микроструктура дерева Билинга в тангенциальном (*а, б*) и поперечном (*в, г*) сечении в масштабе: *а* – 3 мм, *б* – 200 мкм; *в* – 2 мм, *г* – 6 мм

**Fig. 2.** Bilinga timber microstructure at tangential (*a, б*) and at cross-sectional (*в, г*) directions in scales: *a*) 3 mm; *б*) 200 μm; *в*) 2 mm; *г*) 6 mm

образце, МПа [33],  $l$  – характерный размер (длина трещины),  $f(\alpha)$  – безразмерная функция, зависящая от кривизны ударника  $\alpha$ . Пренебрегая последней, получаем  $f(\alpha) = \sqrt{2\pi}$ . При характерном воздействии ультразвукового излучателя на грунт  $P_N = 10$  МПа, КИН на трещине 1 мм будет равен  $K_I = 7,93$  МПа·м<sup>0.5</sup>.

### 3. Результаты моделирования и обсуждение

В отличие от вязких материалов, таких как металлы и полимеры, в хрупких композитах на основе бетона или в каменной породе рост трещин подчиняется другим закономерностям. Известны модели разрушения горных пород и хрупких материалов [34, 35], в которых используются закономерности накопления микротрещин, включающие, например, условие необратимости разрушения Бейли и критерий концентрационного разрушения образования трещин [36], основанный на теории перколяции:

$$N^*(t) = N^*/\tau, \int_0^{\pi} N^* dt = N^*, \quad (1)$$

$$\frac{1}{l^3 \sqrt{l}} = e \quad (2)$$

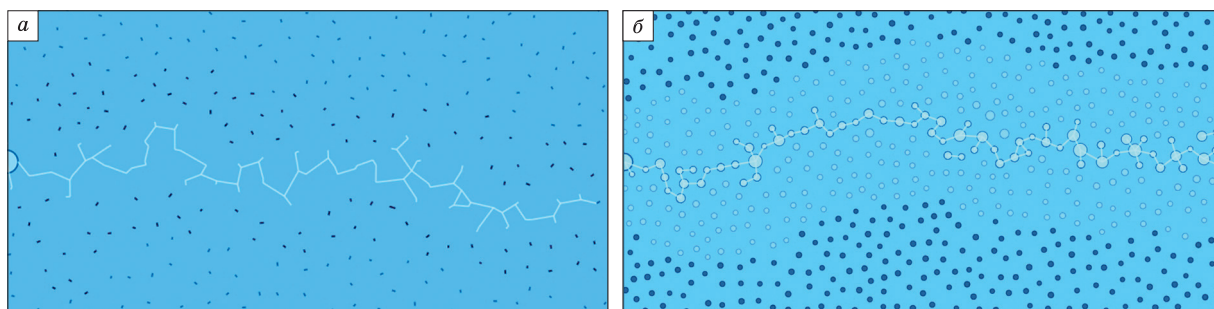
где  $N^*$  – средняя концентрация микротрещин, образовавшаяся в образце при его разрушении, которая может описывать накопление струк-

турных повреждений, действие напряжения и зависимость температуры от времени, м<sup>-3</sup>;  $l$  – средний линейный размер микротрещины, м;  $e = 2,718$  – среднее расстояние между трещинами в образце единичного объема, средний размер которого составляет  $l$ .

Разработанная стохастическая модель разрушения модифицирована алгоритмом роста трещин и пор с использованием кинетического подхода (1)–(2). На рис. 3 показаны результаты компьютерной визуализации роста трещины для различных содержаний модифицированного бетона. Скорость трещины, полученная для различных концентраций фибры, увеличивалась при росте содержания волокна, что соответствует эксперименту (см. табл. 3).

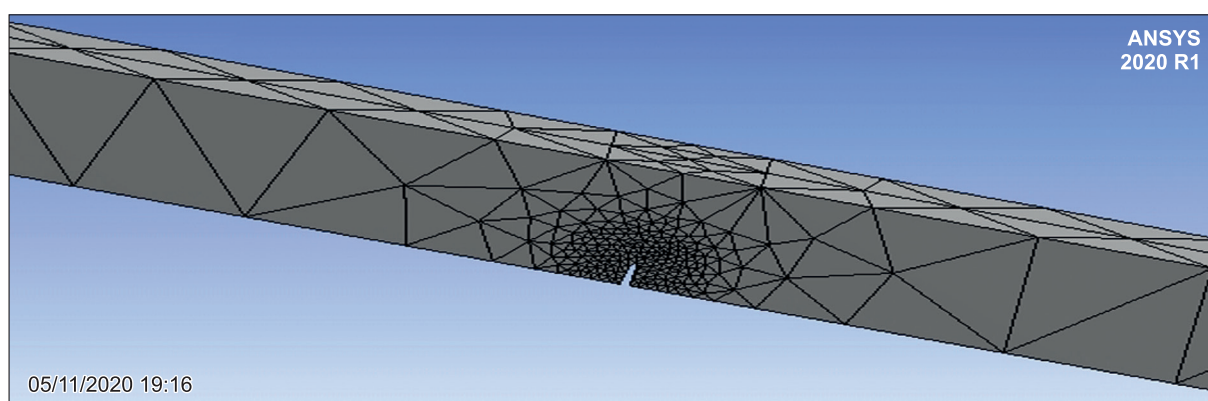
Например, для того, чтобы произвести сравнение макроскопической скорости роста трещины с помощью многомасштабного стохастического моделирования, необходимо качественно выявить механизм разрушения древесины и получить количественные закономерности [37]. В случае хрупкого разрушения разрывом (деформация Mode I) раскрытие трещины осуществляется в процессе изгибной деформации образца, когда внешнее нормальное напряжение направлено перпендикулярно трещине [38].

Для анализа трещиноватых деревянных конструкций в рамках механики разрушения и в ре-



**Рис. 3.** Стохастическая визуализация роста мезоскопической трещины в пористом бетоне без наполнителя (а) и с максимальным содержанием фибры плодов масличной пальмы 1,5 % (б)

**Fig. 3.** Stochastic visualization of crack growth at mesoscale in porous cement without (a) and at maximum fiber content, 1,5 % (б)



**Рис. 4.** Геометрия образца из древесины с сеткой КЭ-разбиения в ANSYS

**Fig. 4.** The geometry of timber sample FE-meshing in ANSYS

альных условиях эксплуатации необходимо учитывать уровень содержания влаги в древесине. Основной проблемой является зависимость от влажности механических свойств материала, а также геометрии образца с растущей трещиной

и без неё. Для лучшего понимания механического поведения нагруженной конструкции исследуется моделирование конструкции с трещиной с учетом изменения влажности.

Численное моделирование выполнено с помощью комплекса конечных элементов ANSYS Workbench 2020R1, с помощью технологии Smart Crack Growth. Геометрия смоделирована в программе SolidsWork с трещинами 4 мм и 8 мм в каждом образце и импортирована в ANSYS Workbench для дальнейшего анализа в ANSYS Mechanical (рис. 4). Коэффициент интенсивности напряжения (КИН) определяет вязкость разрушения материала, в рамках линейно-упругой механики разрушения (ЛМР). Рост усталостной трещины смоделирован с использованием закона Пэриса. Рост трещины был смоделирован на основе образца трещин в режиме растяжения Mode I с начальной длиной трещины 4 и 8 мм.

На рис. 5 представлены кривые деформации образцов без начальной трещины и с трещинами

Т а б л и ц а 3

**Скорость трещины  
согласно стохастической модели, м/с**

Table 3

**Crack growth rate by stochastic modeling, m/s**

Образец	$V$
S <sub>1</sub>	12,0
S <sub>2</sub>	17,6
S <sub>3</sub>	24,8
S <sub>4</sub>	30,5
S <sub>5</sub>	33,7
S <sub>6</sub>	42,4
S <sub>7</sub>	46

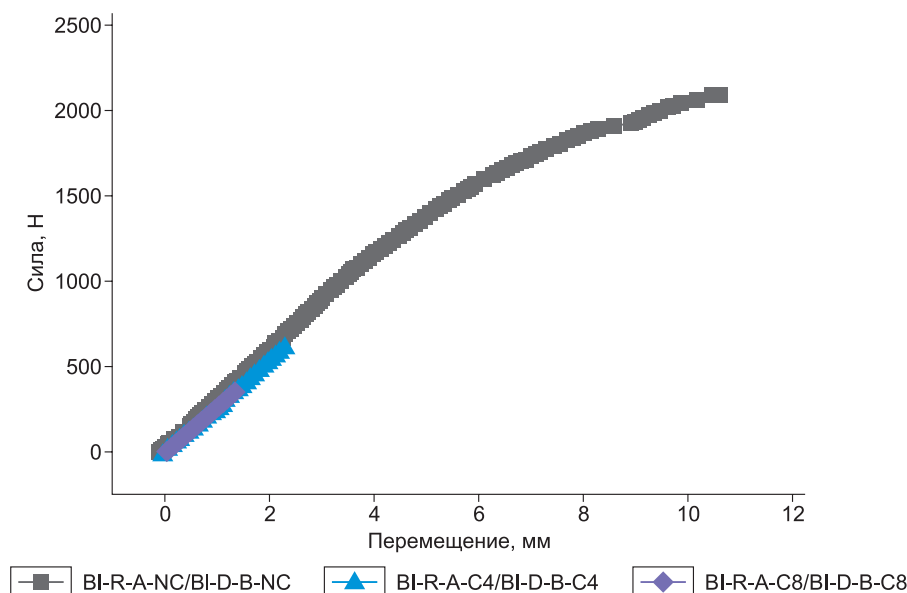


Рис. 5. Диаграмма нагружения для образцов Bilinga без трещины и с трещинами длиной 4 и 8 мм

Fig. 5. Loading curve for Bilinga samples with cracks length 4 and 8 mm

длиной 4 и 8 мм. Для обоих образцов с трещиной не обнаруживается существенных различий в упругом поведении.

Исследование также позволило сравнить поведение различных образцов с начальной трещиной 4 и 8 мм

Расчетные распределения напряжений по мере роста трещины в деревянной балке на 0,333 мм и затем до 0,35 мм представлены на рис. 6.

Но КЭ-моделирование, основанное на концепции изотропного твердого тела, не учитывает структурные неоднородности и анизотропию свойств такого природного композиционного материала, как древесина, даже мягкая [39]. Поэтому для построения модели процессов разрушения необходимо применять подход структурного моделирования. Для древесины также была использована стохастическая модель роста трещины, основанная на механизме вязкой коалесценции пор (сосудов) при росте мелких трещин поперек волокон. Для описания процесса разрушения сложной структуры древесины была введена пространственно-временная иерархия, соответствующая разрабатываемому системно-структурному подходу [40] и отражающая зависимость локальных параметров от нелокальных характеристик напряженного состояния:

$$\delta_C = \frac{2 \cdot K_{IC}}{\pi \cdot \sigma_C^2}; \quad \tau_C = \frac{\delta_C}{c}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость упругих поперечных волн в направлении нагрузки, для дерева  $c \approx 4000$  м/с.  $\delta_C$ ,  $\tau_C$  – характерные размер и время масштабного уровня, для мезоуровня  $\tau_C \sim 10^{-5}$  с, для микроуровня  $\tau_C \sim 10^{-7}$  с.

Исследование также позволило сравнить поведение различных образцов с начальной трещиной 4 и 8 мм. Скорость роста трещин, полученная в эксперименте и в ходе макроскопического моделирования, была проверена с применением стохастического моделирования. Предложен метод анализа роста трещин в дереве в различных условиях окружающей среды, для которых эффект влагопоглощения интегрируется в зону разрушения, так что может быть выявлена связь между механическим поведением древесины и процессом роста трещин. Однако на микромасштабе механизм разрушения описывается законом роста коротких трещин, а большая изменчивость скорости роста трещин на различных масштабах является результатом микроструктурного влияния на локальную движущую силу трещины. Поскольку для древесины закономерности роста коротких трещин исследованы в недостаточной мере, приходится предполагать, что разрушение происходит по механизму роста и коалесценции микропор и микротрещин (см. рис. 2).

Результаты визуализации роста магистральных трещин на мезомасштабе по механизму ро-

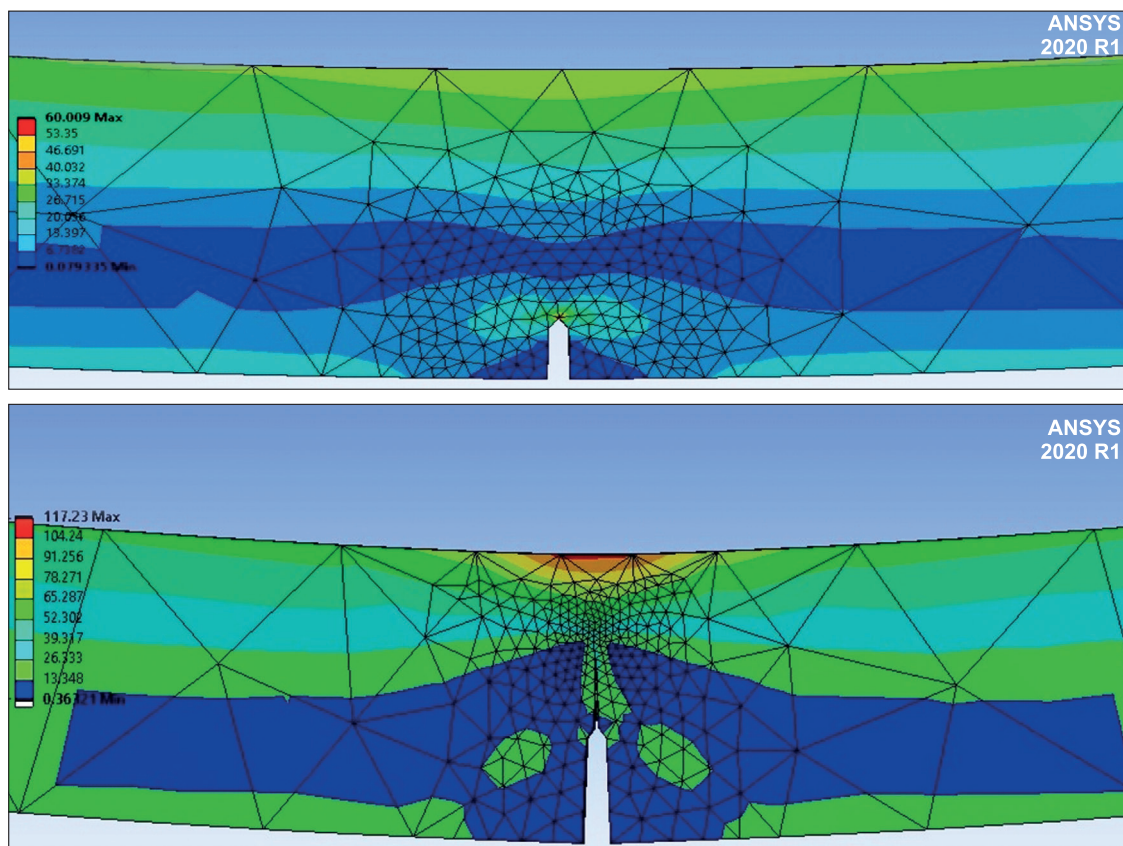


Рис. 6. Распределение напряжений в вершине при росте трещины 0,333 (а) и 0,35 мм (б)

Fig. 6. Stress distribution at crack tip during the growth of crack: a) 0.333 mm; б) 0.35 mm

ста и слияния коротких трещин представлены на рис. 7. Для моделирования роста коротких трещин на микромасштабе использовался механизм слияния микропор (рис. 8).

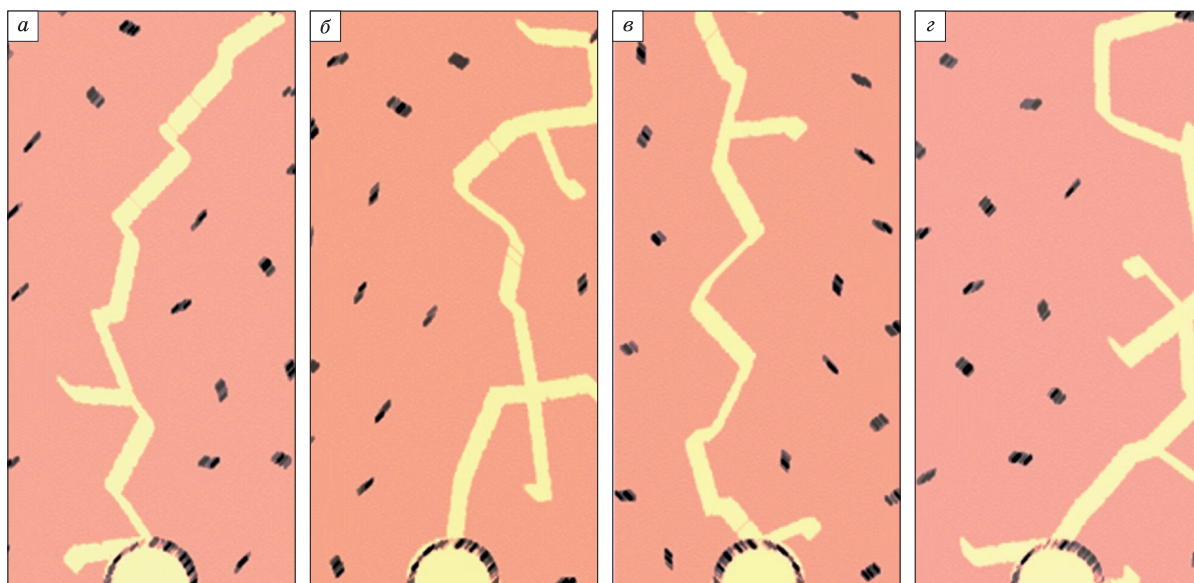
Таким образом, стохастическое моделирование роста трещин в древесине на мезо- и микромасштабах показывает более низкие локальные коэффициенты интенсивности напряжений и более медленный рост трещин из-за существования масштабной-временной иерархии. Скорость роста трещин на макромасштабе равна  $v_{cr} = 0,845-0,9 \cdot 10^{-3}$  м/с, что соответствует  $K_{IC}$ .

Расчетные скорости роста трещин, полученные при различных интенсивностях локального напряжения  $K_I$  при стохастическом моделировании, а также характерные размеры расчетных зон показаны в табл. 4.

Для расчетов воздействия ультразвукового излучателя на грунт были приняты параметры материала, соответствующие вязкости  $\gamma = 0,1386$  МПа·с (соответствует коэффициенту поглощения звука на частоте 10 кГц  $\nu = 1$  1/м), поскольку в случае

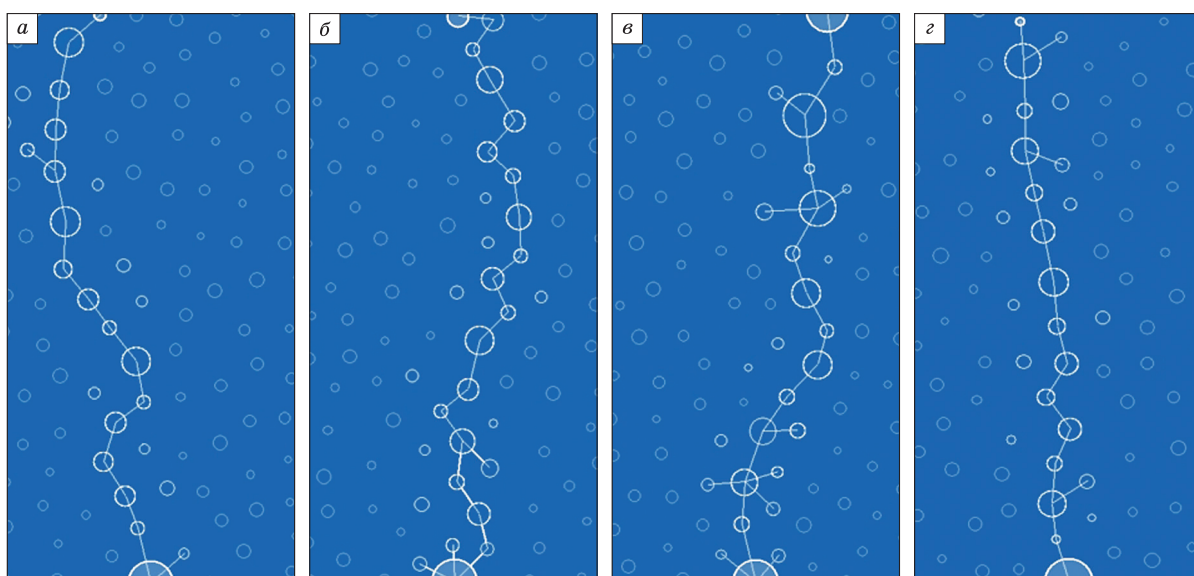
нулевой вязкости скорость роста трещин становится бесконечной; скорость звука  $v = 4500$  м/с; плотность  $\rho = 3000$  кг/м<sup>3</sup>; модуль упругости  $E = 6,1 \cdot 10^4$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; предел прочности на сжатие  $\sigma_{bc} = 120$  МПа; предел прочности на растяжение  $\sigma_{bt} = 8$  МПа.

Для моделирования дезинтеграции (разрушения) грунта использовалась модель визуализации роста трещин, развивающаяся в ИФТПС СО РАН с 2002 г. в основном для задач растрескивания металлов и вязко-хрупких гетерогенных сред [2, 3, 15]. Хотя для выявления закономерностей разрушения хрупких пород необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования, в ряде случаев модель может быть применена и для разрушения скальных пород и грунтов с трещинами или порами как предельного состояния гетерогенных материалов с очень низкой вязкостью (рис. 9). При моделировании разрушения таких материалов было выявлено резкое падение скорости роста трещины при снижении уровня напряжений (КИН) ниже



**Рис. 7.** Рост магистральной трещины в поле микротрещин длиной 10 мкм от вершины диаметром 20 мкм на мезоуровне в расчетной зоне  $1200 \times 1200$  мкм; расстояние между трещинами 25 мкм. КИН  $K_I$ , МПа·м<sup>-0.5</sup>: 35,0 (а), 26,0 (б), 37,0 (в), 38,0 (г) (см. табл. 4)

**Fig. 7.** Main crack growth in secondary cracks field from 20  $\mu\text{m}$  tip at  $1200 \times 1200$   $\mu\text{m}$  area. Distance between crack is 25  $\mu\text{m}$  with normal distribution, at SIF  $K_I$ , МПа·м<sup>-0.5</sup>: а) 35.0, б) 36.0, в) 37.0, г) 38.0 (see Table 4)



**Рис. 8.** Рост вторичной трещины по механизму слияния микропор (5-10 мкм) на микромасштабе в области  $760 \times 380$  мкм. Расстояние между микропорами 10 мкм при КИН  $K_I$ , МПа·м<sup>-0.5</sup>: 53,0 (а), 54,0 (б), 55,0 (в), 56,0 (г) (см. табл. 4)

**Fig. 8.** Secondary crack growth by micropores coalescence (5–10  $\mu\text{m}$ ) in area  $760 \times 380$   $\mu\text{m}$  and distance between the micropore germs 10  $\mu\text{m}$  at КИН  $K_I$ , МПа·м<sup>-0.5</sup>: а) 53.0, б) 54.0, в) 55.0, г) 56.0 (see Table 4)

критического (табл. 5). Для данного типа породы ниже определенной интенсивности напряжений роста трещины не происходит (или происходит очень медленно, как на рис. 9, в), а стабиль-

ный рост наблюдается только в определенном диапазоне значений, превышение которого приводит к полному хрупкому разрушению структуры трещин.

Скорость роста трещины  $v_{cr}$  в древесине согласно стохастической модели

Crack growth rate  $v_{cr}$  in timber according the stochastic modeling

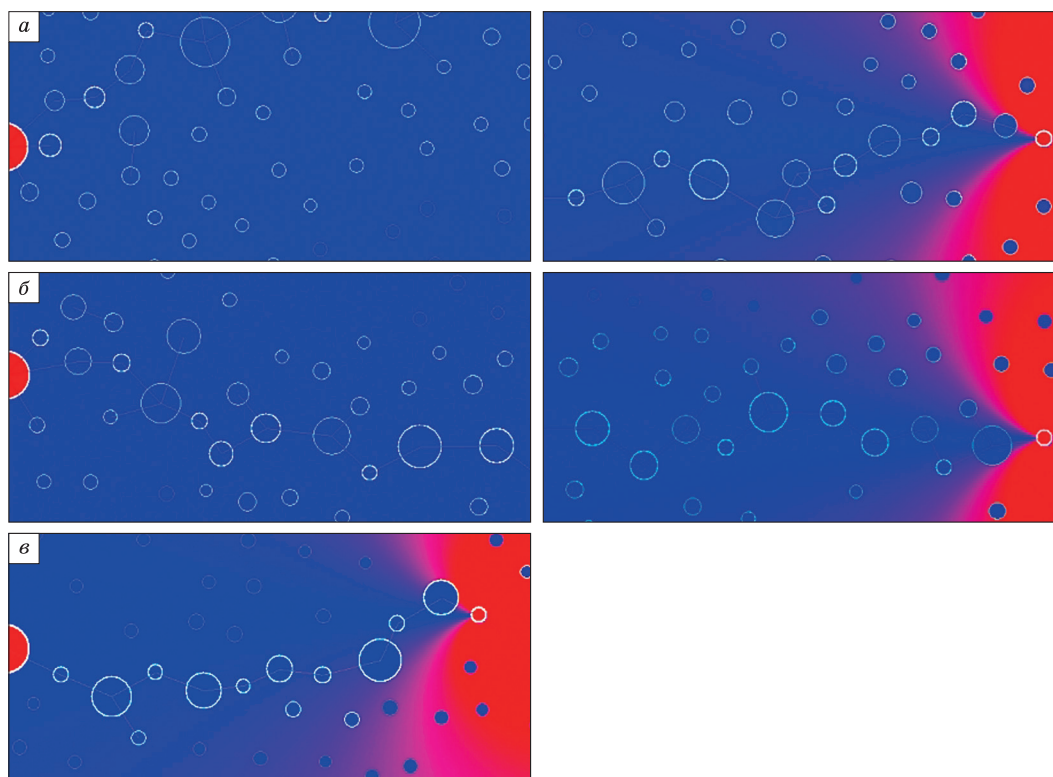
Показатель	Мезомасштаб ( $\delta_C \sim 100$ мкм)				Микромасштаб ( $\delta_C \sim 10$ мкм)			
$K_p, \text{МПа} \cdot \text{м}^{-0,5}$	35,0	36,0	37,0	38,0	53,0	54,0	55,0	56,0
$v_{cr}, \text{м/с}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$

**Заключение**

Метод многоуровневого теоретического, физического и численного моделирования развит в рамках системно-структурного подхода. В отличие от многомасштабного моделирования, многоуровневый метод позволяет абстрагироваться от пространственного масштаба и оперировать с многомерными множествами, включая разновременные и мультифизические модели, путем построения единых аналитических соотношений, так и сшивки различных уровней численными методами. Метод применен для физи-

ческого и численного моделирования кинетики разрушения материалов с субмикроструктурой, перспективных для экстремальных условий Арктики и Субарктики. В частности, исследованы модифицированный органической фиброй бетон, дерево Билинга и плотный грунт в условиях отсутствия влаги. В последнем случае результаты могут быть использованы и для сооружения фундаментов из лунного реголита.

Для испытаний образцов из бетона с органическим наполнителем, дерева твердых сортов и сухого тонкодисперсного грунта применялось



**Рис. 9.** Результаты визуализации роста трещины в пористом грунте (реголит) на начальном этапе (слева) и в конце (справа, с распределением напряжений в вершине) при различных значениях  $K_p, \text{МПа} \cdot \text{м}^{-0,5}$ : 7,93 (а), 6,0 (б), 4,0 (в)

**Fig. 9.** Results of crack growth visualization in porous ground (regolith) at initial (left) and final stage (right) at different  $K_p, \text{MPa} \cdot \text{m}^{-0,5}$ : а) 7.93, б) 6.5, в) 4,0

стандартное механическое оборудование с использованием видеозаписи. Для визуализации и оценки скорости роста микропор и микротрещин применена стохастическая модель разрушения, дополненная алгоритмом роста дефектов с использованием кинетического подхода Бейли и теории перколяции.

Введена иерархия структурных размеров и времен разрушения, а также скоростей трещин на различных масштабах. Результаты стохастического моделирования роста трещин в массивах микротрещин и микропор на мезо- и микроуровнях соответственно показывают, что моделирование изгиба деревянной балки сравнимо с результатами конечно-элементного макроскопического моделирования. Скорость трещины, полученная для различных концентраций органической фибры в пористом бетоне, росла при увеличении содержания волокна, что соответствует эксперименту. Сходные результаты получены и для сухого тонкодисперсного грунта.

### Список литературы / References

- Hughes T. J. R. Multiscale phenomena: Green's functions, the Dirichlet-to-Neumann formulation, subgrid scale models, bubbles and the origins of stabilized methods. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 1995;127:387–401. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(95\)00844-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(95)00844-9)
- Лепов В.В., Архангельская Е.А., Иванова А.А., Лепова К.Я. Многоуровневое иерархическое эволюционное моделирование процессов разрушения материалов. *Вычислительные технологии.* 2008;3(13):315–322.  
[Lepov V.V., Arkhangelskaya E.A., Ivanova A.A., Lepova K.Ya. Multilevel hierarchical evolutionary modeling of the fracture processes of materials. *Journal of Computational Technologies.* 2008; 3(13):315–322. (In Russ.)]
- Lepov V. Multiscale modelling of damage and fracture processes in nanomaterials. *Journal of Physics: Conference Series.* 2011;1(291):012031.
- Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система. *Физическая мезомеханика.* 2011; 3(14):7–26.  
[Panin V.E., Egorushkin V.E. Deformable solid as a nonlinear hierarchically organized system. *Physical Mesomechanics.* 2011;3(14):7–26. (In Russ.)]
- Weinan E., Engquist B., Huang Z.Y. Heterogeneous multiscale method: a general methodology for multiscale modeling. *Phys. Rev. B.* 2003;67:092101.
- Wang, D. L. et al. The fracture mechanism of softwood via hierarchical modelling analysis. *J Wood Sci.* 2019;65:58. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1837-x>

Таблица 5

**Расчетная скорость роста трещины по модели стохастического роста для пористого грунта в зависимости от интенсивности напряжений**

Table 5

**Crack growth rate calculated by stochastic modeling for porous ground depending on the stress intensity**

$v_{crs}$ , М/с	$K_I$ , МПа·м <sup>-0,5</sup>
0,42	7,93
0,29	7,5
0,24	7,0
0,12	6,5
0,076	6,0
0,04	5,5
0,011	5,0
0,002	4,5
<0,0001	4,0

7. Fish J., Wagner G.J., Keten S. Mesoscopic and multiscale modelling in materials. *Nat. Mater.* 2021; 20:774–786. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00913-0>

8. Морозов Е.М. *ANSYS в руках инженера. Механика разрушения.* М.: Ленанд;2014.

[Morozov E.M. *ANSYS in the hands of an engineer. Fracture mechanics.* Moscow:Lenand;2014. (In Russ.)]

9. Lee R. *ABAQUS for Engineers: A Practical Tutorial Book.* Independently Published; 2018.

10. Logg A., Mardal K.A. *Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method. The FEniCS Book.* Springer; 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8>

11. Курушин А.А. *Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL.* Moscow: One-Book; 2016.

[Kurushin A.A. *Solving of multiphysical UHF problems with COMSOL CAD software.* Moscow: One-Book; 2016. (In Russ.)]

12. Коваленко А.В., Узденова А.М., Уртеннов М.Х., Никоненко В.В. *Математическое моделирование физико-химических процессов в среде COMSOL Multiphysics 5.2.* СПб.: Лань; 2017.

[Kovalenko A.V., Uzdenova A.M., Urtenov M.Kh., Nikonenko V.V. *Mathematical modeling of physico-chemical processes in COMSOL Multiphysics 5.2.* Saint Petersburg : Lan, 2017. (In Russ.)]

13. Пермьяков П.П., Аммосов А.П. *Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне.* Новосибирск: Наука; 2003. 224 с.

[Permyakov P.P., Ammosov A.P. *Mathematical modeling of man-made pollution in cryolitozone.* Novosibirsk: Nauka; 2003. (In Russ.)]

14. Broberg B.K. *Crack and Fracture.* London: Academic Press;1999.

15. Лепов В.В., Ачикасова В.С., Иванова А.А., Лепова К.Я. Структурный подход к многомасштабному моделированию эволюционных процессов в материалах с внутренней микроструктурой. *Наука и образование*. 2015;4(80):82–87.
- [Lepov V.V., Achikasova V.S., Ivanova A.A., Lepova K.Ya. Structural approach to multiscale modeling of evolution processes in materials with internal microstructural. *Nauka i Obrazovanie*. 2015;4(80):82–87. (In Russ.)]
16. Lou, C., Xu, J., Wang, T. et al. Microstructure and pore structure of polymer-cement composite joint sealants. *Sci Rep*. 2021;11:1427. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81088-9>
17. Bisong M.S., Lepov V.V., Landrine T. Physico-mechanical characteristics and multiscale stochastic modeling of cement mortar reinforced with oil palm mesocarp fibers. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2022;5(88):62–70.
18. Лепов В.В. Надежность и ресурс технических систем в экстремальных условиях эксплуатации. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020;6(86):36–39.
- [Lepov V.V. Reliability and Resource of Engineering Systems in Extreme Environment. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2020;6(86):36–39. (In Russ.)]
19. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения. *Вестник Российской академии наук*. 2017;9(87):827–839.
- [Buznik V.M., Kablov E.N. Status and Prospects of the Arctic Material Science. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2017;9(87):827–839. (In Russ.)]
20. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина В.М. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016;59(1):11–22.
- [Leontiev L.I., Grigorovich K.V., Kostina V.M. Fundamental research as base of design of the new materials and technologies in the field of metallurgy. *Izvestia Vuzshih Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgia*, 2016; 59(1):11–22. (In Russ.)]
21. Lepov V., Petrov N., Pavlov N. System analysis of the modern materials and technologies in power engineering and industry for the russian north and arctic. *AIP Conf. Proc*. 2023;2552:080026. <https://doi.org/10.1063/5.0112831>
22. Yue Liu, Tianlu Zhao, Wangwei Ju, Siqi Shi. Materials discovery and design using machine learning. *Journal of Materiomics*. 2017; 3(3):159–177.
23. Ziheng Lu. Computational discovery of energy materials in the era of big data and machine learning: A critical review. *Materials Reports: Energy*. 2021; 1:100047.
24. Макаров П.В. и др. Изучение деформации и разрушения геоматериалов и геосред как иерархически организованных систем. *Физическая мезомеханика*. 2005;8:17–20.
- [Makarov P.V. et al. Research of the deformation and fracture of the geomaterials and geomédias as an hierarchically organized systems. *Physical mesomechanics*. 2005;8:17–20. (In Russ.)]
25. Perdikis D., Huys R., Jirsa V.K. Time scale hierarchies in the functional organization of complex behaviors. *PLoS Comput Biol*. 2011;7(9):e1002198.
26. Логинов Б.А. Первый в мире сканирующий зондовый микроскоп в виде спутника как старт этапа научных спутников-лабораторий. *Наноиндустрия*. 2021; 5(14):270–275.
- [Loginov B.A. World's first the satellite scanning probe microscope as a start stage of the scientific laboratory-satellite. *Nanoindustry*. 2021;5(14):270–275. (in Russ.)]
27. Низина Т.А., Балыков А.С. Анализ комплексного влияния модифицирующих добавок и дисперсного армирования на физико-механические характеристики мелкозернистых бетонов. *Региональная архитектура и строительство*. 2016;2:13–25. <https://doi.org/10.5862/MCE.62.2>
- [Nizina T.A., Balukov A.S. Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 2:13–25. <https://doi.org/10.5862/MCE.62.2> (In Russ.)]
28. Иванов В.В., Егорво П.В., Пимонов А.Г. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах и задача прогнозирования динамических явлений. *ФТПРПИ*. 1990;187/34:32–35.
- [Ivanov V.V., Egorov P.V., Pimonov A.G. Statistical theory of emission processes in stressed structurally heterogeneous rocks and problem of prediction of dynamic phenomena. *FTPRPY*. 1990;187/34:32–35. (in Russ.)]
29. Bisong M.S., Lepov V.V., Landrine T. Physico-mechanical characteristics and multiscale stochastic modeling of cement mortar reinforced with oil palm mesocarp fibers. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2022;5(88):62–70.
30. Suknev S.V. TCD-based criteria for quasi-brittle fracture of material sand structures. *Procedia Structural Integrity*. 2019;20:30–36.
31. Барсуков Р.В., Генне Д.В., Нестеров В.А., Хмельёв В.Н., Голых Р.Н., Барсуков А.Р. Патент на изобретение 2785271 С1, 05.12.2022. Заявка № 2022123193 от 29.08.2022.
- [Barsukov R.V., Genne D.V., Nesterov V.A., Khmel'ev V.N., Golykh R.N., Barsukov A.R. Patent for Invention 2785271 С1, 05.12.2022. Application No. 2022123193 dt. 29.08.2022. (In Russ.)]
32. Хмельёв В.Н., Голых Р.Н., Quan Q., Барсуков Р.В., Минаков В.Д., Генне Д.В., Абраменко Д.С., Нестеров В.А., Хмельёв М.В. Теоретическая разработка метода контроля свойств твердых взвешенных почв при помощи ультразвукового воздействия. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2022;1(41):23–29.
- [Khmel'ev V.N., Golykh R.N., Quan Q. et al. Theoretical development of Control Method for Hard Extrater-

restrial Soil Properties by the ultrasound impact. *Uzhno-Sibirskiy Nauchny Vestnik*. 2022;1(41):23–29. (In Russ.)]

33. Черепанов Г.П. *Механика разрушения*. М.: УРСС; 2012.

[Cherepanov G.P. *Fracture Mechanics*. Moscow: URSS; 2012. (In Russ.)]

34. Черникова Т.М., Иванов В.В., Михайлова Е.А. О кинетике разрушения материалов при их растяжении. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2005;2(46):75–77.

[Chernikova T.M., Ivanov V.V., Mikhailova E.A. On the fracture kinetics of materials under tension. *Bulletin of Kuzbass State Technical University*. 2005;2(46):75–77. (In Russ.)]

35. Suknev S.V., Novopashin M.D. Criterion of normal tension crack formation in rocks under compression. *Journal of Mining Science*. 2003;39:132–139.

36. Ботвина Л.Р., Солдатенков А.П. О концентрационном критерии разрушения. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2017;4(39):477–490.

[Botvina L.R. and Soldatenkov A.P. On the Concentration Criterion of Fracture. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017;4(39):477–490. (In Russ.) <https://doi.org/10.15407/mfint.39.04.0477>]

37. Glukhikh V.N, Okhlopkova A.Y., Sivtsev P.V. *Numerical simulation of deformations of softwood-sawn timber*. Lecture Notes in Computer Science. 2018; 10665LNCS:483-490.

37. Shao Z., Wang F. *Fracture of Wood Along Grain*. In: *The Fracture Mechanics of Plant Materials*. Springer: 2018;27–62. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-9017-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-9017-2_3)

39. Wang D.L., et al, *The fracture mechanism of softwood via hierarchical modelling analysis*. *J. Wood Sci.* 2019;65:58. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1837-x>

40. Lepov V.V., Panteleev K.D., Rahmilevich E.G., Yrcev E.S. A system approach to research development and creation of the complex engineering systems for Arctic and Subarctic. *Procedia Structural Integrity*. 2020; 30(22):82–86. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.014>

#### Об авторах

ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, доктор технических наук, директор, Researcher ID: F-9875-2011, Author ID: 6508081764, РИНЦ: SPIN-код: 1397-6725, AuthorID: 1747, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, e-mail: wisecold@mail.ru

БИСОНГ Самуэль Мбелле, старший преподаватель, кафедра сварки, Author ID: 57196030563, <https://orcid.org/0000-0001-9238-1231>, e-mail: mbellesabi@yahoo.com

ГОЛЫХ Роман Николаевич, доктор технических наук, РИНЦ: SPIN-код: 7832-0909, Author ID: 631124, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>, e-mail: romangl90@gmail.com

#### About the authors

LEPOV, Valeriy Valerievich, Dr. Sci. (Engineering), Director, Researcher ID: F-9875-2011, Author ID: 6508081764, РИНЦ: SPIN-код: 1397-6725, AuthorID: 1747, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, e-mail: wisecold@mail.ru

BISONG, Mbelle Samuel, Senior Lecturer, Author ID: 57196030563, <https://orcid.org/0000-0001-9238-1231>, e-mail: mbellesabi@yahoo.com

GOLYKH, Roman Nikolaevich, Dr. Sci. (Engineering), РИНЦ: SPIN-код: 7832-0909, Author ID: 631124, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>, e-mail: romangl90@gmail.com

Поступила в редакцию / Submitted 07.02.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.02.2023

Принята к публикации / Accepted 02.03.2023