



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-899>

УДК 622.02:004.925.84

**Исследование границ применимости фотополимерной 3D-печати для физического моделирования в геонауках****Е. В. Кожевников¹   , М. С. Турбаков¹  , З. Г. Иванов¹  ,****Е. П. Рябоконт¹  , П. А. Каменев²  **¹ *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация*² *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Российская Федерация* kev@pstu.ru**Аннотация**

Дефицит природного кернового материала и невозможность его многократного использования в лабораторных экспериментах обуславливают необходимость поиска альтернативных способов получения образцов для геомеханических исследований. В связи с этим всё более востребованным становится применение реплик горных пород, изготовленных методами 3D-печати. Одним из таких методов выступает 3D-LCD-печать – доступная и точная технология стереолитографии, основанная на послойном отверждении жидких фотополимеров через жидкокристаллический дисплей. В связи с этим целью настоящей работы являлось: экспериментальная оценка физико-механических характеристик материалов, получаемых данным методом, и их сопоставление с параметрами природных горных пород. Для решения поставленных задач был проведён комплекс испытаний, включающий микроструктурный анализ, неразрушающие исследования на основе измерения скорости упругих волн и испытания на одноосное сжатие. Испытания показали, что напечатанные образцы характеризуются высокой изотропией упругих свойств и стабильностью механических параметров при изменении условий постотверждения и хранения. Показано также, что наклон слоёв относительно направления нагружения существенно влияет на предел прочности и модуль Юнга: максимальные значения прочности достигаются при угле ориентации 60° (до 162 МПа), минимальные – при 30° (до 120 МПа). Сравнение с данными испытаний природных силицитов, окремнённых доломитов и опок выявило соизмеримость механических характеристик и сходство деформационного поведения в области упругих деформаций (до 20 МПа). Таким образом, 3D-LCD-реплики горных пород могут быть использованы для физического моделирования геотехнических процессов и оценки параметров разрушения в лабораторных условиях, однако требуют учёта различий в механизмах разрушения при пластическом деформировании.

Ключевые слова

3D-печать, фотополимерная печать, реплики горных пород, одноосное сжатие, анизотропия, модуль Юнга, геомеханика, упругие свойства, 3D-LCD-технология

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-19-00699, <https://rscf.ru/project/23-19-00699/>


Для цитирования

Kozhevnikov E. V., Turbakov M. S., Ivanov Z. G., Riabokon E. P., Kamenev P. A. Assessing the limits of applicability of photopolymer 3D printing for physical modeling in geosciences. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2026;11(1):56–69. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-899>



MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Assessing the limits of applicability of photopolymer 3D printing for physical modeling in geosciencesE. V. Kozhevnikov¹   , M. S. Turbakov¹  , Z. G. Ivanov¹  ,
E. P. Riabokon¹  , P. A. Kamenev²  ¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation² Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation kev@pstu.ru**Abstract**

The limited availability of natural core material and its unsuitability for repeated use in laboratory experiments create a need for alternative ways of producing specimens for geomechanical investigations. Against this background, 3D-printed rock replicas are attracting increasing interest. Among the available approaches, 3D-LCD printing is a readily accessible and precise stereolithographic technology based on the layer-by-layer curing of liquid photopolymers through a liquid-crystal display. The aim of this study was to experimentally evaluate the physical and mechanical properties of materials produced by this method and to compare them with those of natural rocks. To address this aim, a set of tests was performed, including microstructural analysis, nondestructive testing based on elastic-wave velocity measurements, and uniaxial compression tests. The results showed that the printed specimens were characterized by a high degree of isotropy in their elastic properties and by stable mechanical parameters under varying post-curing and storage conditions. The inclination of the printed layers relative to the loading direction was also found to have a significant effect on compressive strength and Young's modulus: the highest strength values were obtained at an orientation angle of 60° (up to 162 MPa), whereas the lowest were recorded at 30° (up to 120 MPa). Comparison with test data for natural silicites, silicified dolomites, and opoka, a carbonate-siliceous sedimentary rock, showed comparable mechanical properties and similar deformation behavior within the elastic range (up to 20 MPa). Thus, 3D-LCD rock replicas can be used for the physical modeling of geotechnical processes and for laboratory studies of failure behavior; however, differences in failure mechanisms during plastic deformation must be taken into account.

Keywords

3D printing, photopolymer printing, rock replicas, uniaxial compression, anisotropy, Young's modulus, geomechanics, elastic properties, 3D-LCD technology

Funding

This study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 23-19-00699, <https://rscf.ru/project/23-19-00699/>

For citation

Kozhevnikov E. V., Turbakov M. S., Ivanov Z. G., Riabokon E. P., Kamenev P. A. Assessing the limits of applicability of photopolymer 3D printing for physical modeling in geosciences. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2026;11(1):56–69. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-899>

Введение

Для замены дефицитного кернового материала и обеспечения возможности его многократного использования в исследовательских целях научными коллективами предлагается применять приближенные копии образцов горных пород – реплики, изготовленные при помощи 3D-аддитивных технологий [1, 2]. Данный подход все чаще используется в горнодобывающей [3] и нефтяной промышленности [4] для изучения механических свойств горных пород и их проницаемости в зависимости от внутренней структуры и характера нагружения. Основным преимуществом использования таких реплик является возможность создать требуемое количество образцов для реализации широкого спектра исследований, в том числе деструктивных [5, 6].

В настоящее время существуют различные технологии создания 3D-моделей горных пород. Выбор технологии печати и материала зависит от предполагаемой цели исследования [7]. Так, образцы могут быть изготовлены методом послойной наплавки пластикового филамента (FDM или FFF), послойного отверждения жидкой смолы (стереолитография – SLA), послойного наложения гипса [8] или смесей цемента, кремнезема и воды [9], а также послойного склеивания кварцевого песка при помощи специальных отвердителей – фурановой кислоты [10], цианакрилового клея [11], фурфуролового спирта и смол на фенольной основе [12]. Таким образом, перечисленные методы 3D-печати отличаются преимущественно видами используемого материала [12].



В экспериментальных исследованиях, связанных с физическим моделированием горных пород, предпочтительнее всего использовать материалы, имеющие схожие физико-механические характеристики, такие как гипс, песок-цемент. Однако существующие методы печати с минеральными компонентами обладают низкой разрешающей способностью и не позволяют воспроизвести внутреннюю структуру образцов [13]. Образцы, изготовленные при помощи наплавки пластикового филамента (FDM или FFF), редко применимы в качестве реплик горных пород из-за низкого разрешения печати и нехарактерных для естественных пород структуры и свойств материала [14].

Технология 3D-печати методом стереолитографии (SLA), основанная на послойном отверждении фотополимерных смол, обладает наилучшим качеством печати и используется не только на практике, но и в научных исследованиях [15]. SLA-методы разделяют в зависимости от способа облучения фотополимерной смолы на лазерные [16], цифровые (DLP) [17] и ЖК-стереолитографические (LCD) [18]. Разрешение печати методом SLA является наиболее высоким, что позволяет точно воспроизводить микронеоднородности, присущие исходным объектам, поэтому данный метод широко применяется при изготовлении пористых и трещиноватых реплик горных пород [19]. Печать через жидкокристаллический дисплей (LCD) – наиболее доступный и быстрый метод стереолитографии, поэтому он является перспективным для изготовления реплик горных пород при геомеханических исследованиях, так как позволяет добиваться высокой степени репликации с минимальной стоимостью и в короткие сроки [20].

Таким образом, анализ существующих исследований показал, что для создания точных реплик горных пород наиболее перспективным является метод 3D-LCD-печати. Цель данной работы – экспериментальная оценка возможности применения этого метода для изготовления реплик горных пород при изучении их геомеханических характеристик, а также определение граничных условий его применимости при физическом моделировании. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование микроструктуры 3D-LCD-реплик и оценка ее влияния на упругие и механические свойства;
- проведение сравнительных испытаний реплик и горных пород на одноосное сжатие;
- исследование влияния угла ориентации слоев при печати на модуль Юнга образцов.

1. Теория

Изучению механических свойств материала 3D-LCD-печати посвящено достаточно много работ, в которых установлено, что наибольшее влияние на них оказывают условия печати [21–23] и сушки [24, 25]. Однако при прочих равных условиях определяющей характеристикой 3D-LCD-печати является послойная неоднородность получаемых деталей [26, 27]. Слоистая структура обуславливает анизотропию механических характеристик в зависимости от угла ориентации

слоев из-за присущей каждому слою неоднородности и наличия межслоевых контактов.

Обзор литературы показал, что результаты экспериментальных исследований влияния угла ориентации слоев могут быть противоположными. Независимые коллективы авторов на основе экспериментальных исследований влияния угла печати на прочность деталей при сжатии и растяжении приходят к выводу, что образцы со слоями, параллельными направлению растяжения, обладают наибольшей прочностью Юнга и прочностью [28, 29, 30]. При сжатии наивысшими механическими свойствами, по данным некоторых исследований, обладают образцы с наклонными слоями [31, 32]. Ли и Тэн [28] объяснили это явление более слабой связью между слоями, предположив, что угол наклона слоев влияет на прочность сцепления материала. Также авторы отмечают, что на прочность влияет наличие дефектов в деталях, которые образуются из-за особенностей печати – неровности краев, пузырьки воздуха, инородные включения.

В других исследованиях [21, 25, 33] экспериментально установлено, что прочность образцов со слоями, ориентированными параллельно растягивающей нагрузке, ниже, чем у образцов с перпендикулярным направлением слоев относительно нагрузки. Авторы [22] указывают, что причиной этому является влияние траектории перемещения лазера при отверждении. В работе [34] показано, что наибольшим модулем Юнга обладают образцы при растяжении вдоль наложения, при этом образцы с наклонными слоями демонстрируют большую прочность и деформацию. Также установлено, что уменьшение толщины слоя повышает прочностные и упругие характеристики [33]. У образцов со слоями, перпендикулярными нагрузке, модуль Юнга несколько выше, но прочность заметно ниже при любой толщине слоя. Уменьшение толщины слоя способствует повышению хрупкости материала, что обуславливает большую жесткость и сниженную прочность.

Таким образом, несмотря на имеющиеся исследования влияния ориентации слоев на прочностные свойства деталей, изготовленных по технологии 3D-LCD-печати, в литературе сохраняется значительный пробел в понимании зависимости механических характеристик от направления прикладываемой нагрузки. Большинство работ сосредоточено преимущественно на прочности при растяжении, тогда как исследования прочности при сжатии представлены ограниченно, а полученные результаты зачастую противоречивы. Расхождение в данных препятствует пониманию механизма разрушения и факторов, способствующих изменению прочности в зависимости от ориентации слоев печати. Недостаточная изученность свойств материалов также ограничивает применение технологии 3D-LCD-печати для изготовления реплик горных пород при геомеханических исследованиях.

Решению упомянутых проблем посвящена данная работа. Научная новизна заключается в установлении зависимости механических свойств 3D-LCD-реплик горных пород от ориентации угла печати и микроструктуры материала, а также в определении

границ применимости таких реплик для физического моделирования. На основании данных, полученных в ходе экспериментальных исследований и сравнительного анализа, сделан вывод о пригодности метода 3D-LCD-печати для изучения геотехнических процессов.

2. Методика

2.1. Изготовление образцов

Цифровые модели образцов создавались в соответствии со стандартом ASTM D7012-23 с соотношением длины к диаметру 2:1 и составляли 70 мм в длину и 35 мм в диаметре. Модели экспортировались в формат STL для последующей предпечатной подготовки. В специализированном программном обеспечении образцы размещались на рабочем столе, имитирующем подвижную платформу 3D-принтера. Образцы полойно разбивались с разными углами наклона слоев (рис. 1, а), по 3 образца на каждый угол печати. Углы 90, 60, 30 и 0° соответствуют углу между плоскостью слоя и осью образца. Образцы печатались на подложках. Все образцы имели ориентацию вдоль оси Y принтера.

Образцы печатались на принтере Anycubic Photon Mono X методом LCD (см. рис. 1, а). Время экспозиции слоя, составлявшее 2 с, было определено в ходе предварительных испытаний как оптимальное для обеспечения высокого качества и скорости печати. Толщина слоя составляла 50 мкм (стандартное значение для данной модели принтера). Для печати использовалась смола Anycubic Basic Resin Black; черный цвет был выбран для минимизации влияния паразитной засветки на качество печати.

После печати образцы очищались в ультразвуковой ванне с изопропиловым спиртом. В результате были получены цилиндрические образцы номинальным диаметром 35 мм и длиной 70 мм (рис. 1, б, в). Выбор указанных размеров обусловлен следующими факторами:

1. Ограниченный размер области печати принтера Anycubic Photon Mono X не позволяет одновременно изготавливать большое количество крупных образцов. При этом одновременное изготовление партии образцов с одинаковыми углами печати критически важно для обеспечения их однородности в пределах выборки.

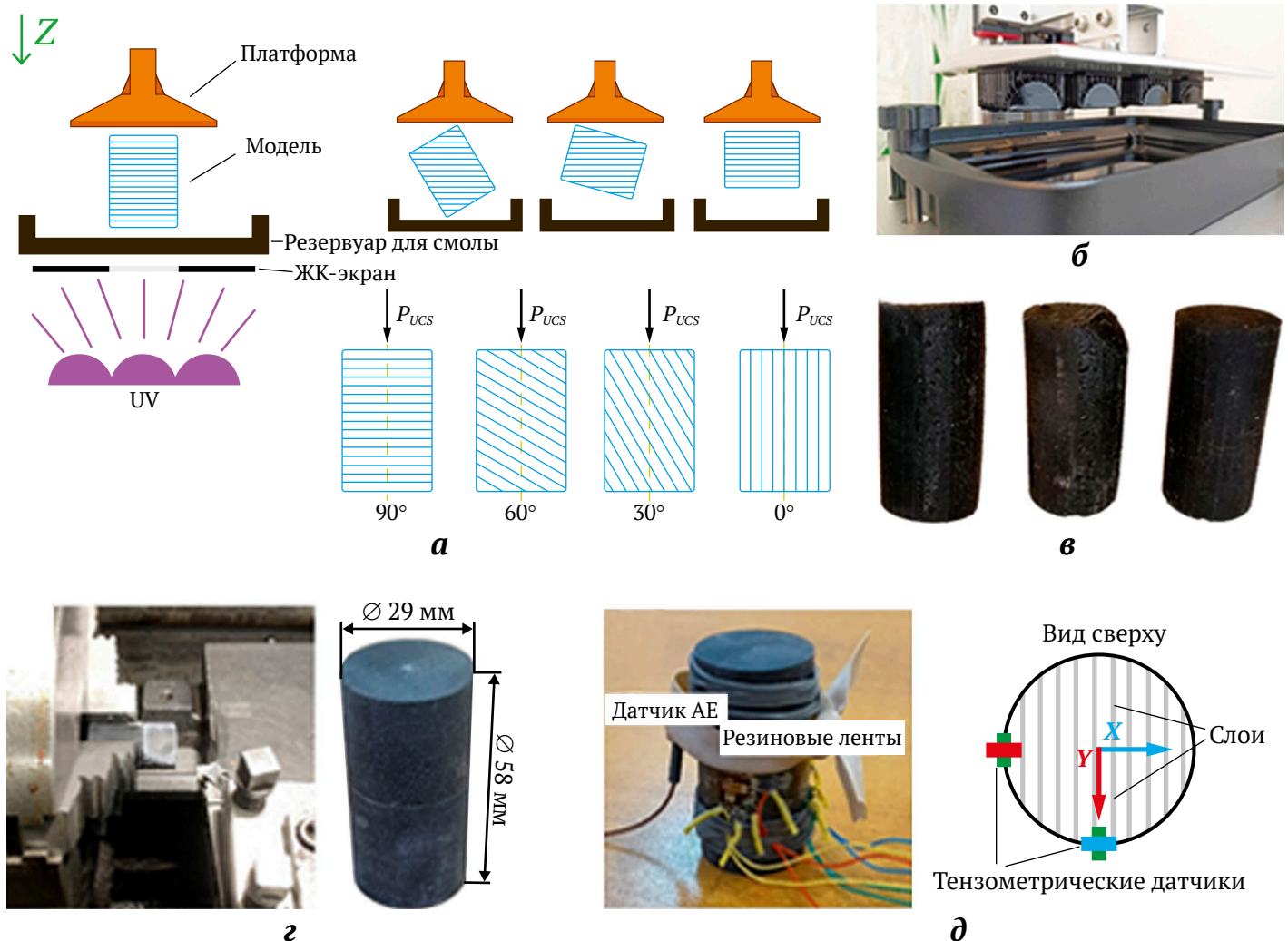


Рис. 1. Изготовление образцов:

а – схематическое изображение печати образцов с разными углами слоев; б – печать образцов;

в – напечатанные образцы; г – обработка образцов;

д – готовый образец с датчиками продольных и поперечных деформаций и акустической эмиссии (АЭ)

2. Ввиду особенностей технологии (послойное отверждение смолы и отрыв напечатанного слоя от ЖК-дисплея) увеличение размеров образцов ведет к росту площади контакта с дисплеем и, как следствие, к кратному увеличению усилия отрыва. Это может вызвать преждевременное отслаивание реплик, отрыв поддержек, а также провисание слоев и отклонение фактических толщин и углов наклона от заданных значений.

Образцы, напечатанные с параллельными и наклонными слоями (см. рис. 1, в), имели отклонения от цилиндрической формы из-за провисания слоев в процессе печати. В связи с явными дефектами они были подвергнуты механической обработке на токарном станке для придания правильной цилиндрической формы (рис. 1, г). В результате были получены образцы с параллельными торцами, диаметром 29 мм и длиной 58 мм, что соответствует требованиям стандарта ASTM D7012-23.

Готовые образцы высушивались в ультрафиолетовой камере. До и после механической обработки они хранились в темном месте для минимизации воздействия естественного света. Температура и влажность при хранении соответствовали нормальным комнатным условиям; все образцы находились в одинаковой среде, что исключает влияние условий хранения на результаты испытаний [25, 33, 35].

2.2. Горные породы

Поскольку реплики пород считаются однородными, для сравнения были выбраны породы с однородной мелкокристаллической структурой – силициты (микрозернистый кварц), окремненные доломиты и опоки. Для оценки механических свойств в широком диапазоне прочности, а также для изучения анизотропии были отобраны образцы различных литотипов. Силициты составили группы 1 и 2, окремненные доломиты – группу 3, опоки – группу 4.

Образцы вырезались перпендикулярно напластованию (группы 1 и 3) и параллельно напластованию (группы 2 и 4). Для механических испытаний были изготовлены цилиндрические образцы размером 30 × 60 мм (рис. 2).



Рис. 2. Цилиндрические образцы силицитов (1, 2), окремненных доломитов (3) и опоки (4) для испытаний на одноосное сжатие

2.3. Испытание на одноосное сжатие

Испытания на одноосное сжатие проводились с использованием установки Rock Mechanics Test System 816. Для измерения продольных и поперечных деформаций на боковую поверхность образцов наклеивались тензодатчики; регистрация данных осуществлялась системой записи установки. Две пары тензодатчиков располагались относительно осей принтера. В средней части боковой поверхности образцов также закреплялся датчик акустической эмиссии для регистрации сигналов в процессе нагружения. Схема расположения датчиков приведена на рис. 1, д.

Во время нагружения данные с датчиков нагрузки, деформации и системы регистрации сигналов АЭ записывались на компьютер. Для регистрации сигналов акустической эмиссии применялся измерительный комплекс А-Line 32D. Нагружение образцов осуществлялось до разрушения при постоянной скорости 0,1 МПа/с, что соответствует требованиям стандарта ASTM D7012-23.

2.4. Неразрушающие методы контроля прочности

Неразрушающие методы контроля включают измерение скорости распространения продольных и поперечных упругих волн. Динамика этого показателя отражает изменение механических свойств материала во времени и позволяет оценить анизотропию как самих реплик, так и горных пород. Применение неразрушающих методов для изучения фотополимерных смол особенно актуально, поскольку материал изменяет свои свойства в процессе постобработки (например, при ультрафиолетовом облучении и хранении), а также обладает слоистой структурой [25, 33]. Измерение скорости упругих волн выполнялось на приборе «Ультразвук» (ООО «ЭкогеосПром», Россия).

3. Результаты

3.1. Изменения механических свойств в процессе обработки

Критерием достаточности времени постотверждающего УФ-воздействия служила стабилизация скорости упругих волн. Зависимости скоростей волн от продолжительности УФ-отверждения представлены на рис. 3. После 1 мин воздействия скорость упругих волн резко возрастает по сравнению с необработанным образцом, а затем изменяется незначительно, что свидетельствует о достаточности одной минуты для внешнего упрочнения образца. Четырех минут УФ-воздействия достаточно для достижения полной полимеризации материала: дальнейшая выдержка не приводит к изменению механических свойств. Это подтверждается постоянством скорости упругих волн после 8 мин обработки – УФ-излучение уже не проникает вглубь образца, и более длительное облучение не требуется.

Также установлено, что время хранения не влияет на внутреннюю полимеризацию материала при комнатных условиях в темном месте. Скорость продольных и сдвиговых волн оставалась неизменной после 14 сут хранения (см. рис. 3).

3.2. Анизотропия

Анизотропия образцов оценивалась в продольном и поперечном направлениях (параллельно и перпендикулярно напечатанным слоям) (рис. 4). Выбора этих направлений достаточно, поскольку именно в них слоистые материалы демонстрируют наибольшее различие механических свойств [25]. Результаты ультразвуковых измерений показали, что скорости волн поперек и вдоль слоев совпадают в пределах погрешности. Одинаковые значения модулей Юнга и сдвига (см. рис. 3) свидетельствуют о высокой степени изотропии 3D-LCD-образцов при оценке упругих свойств неразрушающим методом.

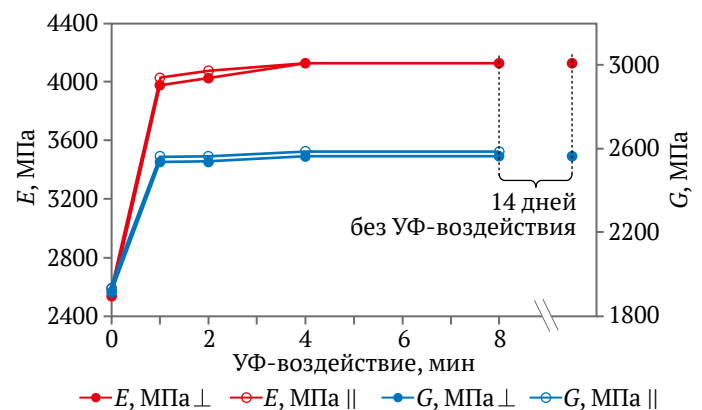
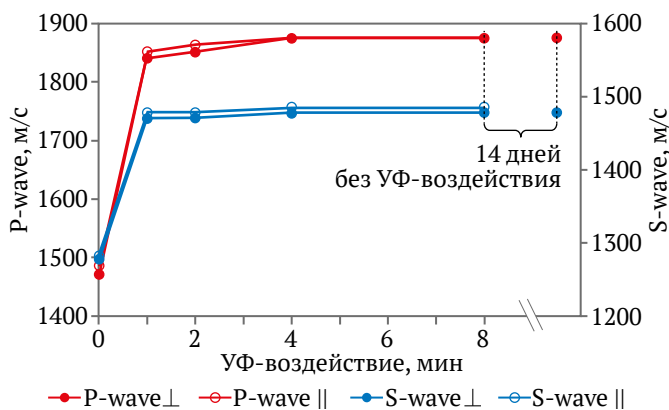
Неразрушающий контроль эффективен для оценки стабильности свойств реплик при хранении и в программах длительных испытаний, а также для изучения влияния атмосферного отверждения на материал. Методы ультразвукового контроля служат полезным вспомогательным инструментом для косвенной оценки упругих свойств, однако они не позволяют судить об истинном поведении материала при нагружении вплоть до разрушения. Ограничением методов является также зависимость скорости упру-

гих волн от плотности, наличия неоднородностей и пустот (включая искусственно созданные трещины и поры); кроме того, они применимы только для неповрежденных образцов правильной формы.

Важно отметить, что изготовленные методом 3D-LCD-печати образцы не проявляют начальной анизотропии. Это обеспечивает чистоту результатов, высокую воспроизводимость экспериментальных данных и возможность тонкой настройки параметров исследований.

3.3. Испытания на одноосное сжатие

По результатам одноосного сжатия установлено, что наибольшей прочностью обладают образцы с ориентацией слоев под углом 60° к вектору нагрузки – в среднем 158 МПа (максимальное значение 162 МПа, минимальное – 156 МПа). Наименьшую прочность продемонстрировали образцы с углом наклона слоев 30°: среднее значение составило 138 МПа при максимуме 140 МПа и минимуме 120 МПа (рис. 5). Образцы с параллельным (0°) и перпендикулярным (90°) расположением слоев показали близкие значения прочности – в среднем 146 и 147 МПа соответственно.



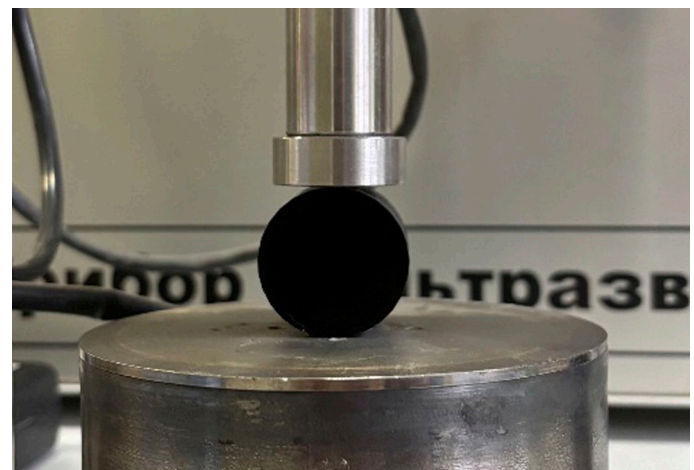
а

б

Рис. 3. Влияние времени постотверждающего УФ-воздействия на скорость упругих волн (а) и расчетные значения модуля Юнга и модуля сдвига (б)



а



б

Рис. 4. Измерение скорости упругих волн в аксиальном (а) и радиальном (б) направлениях

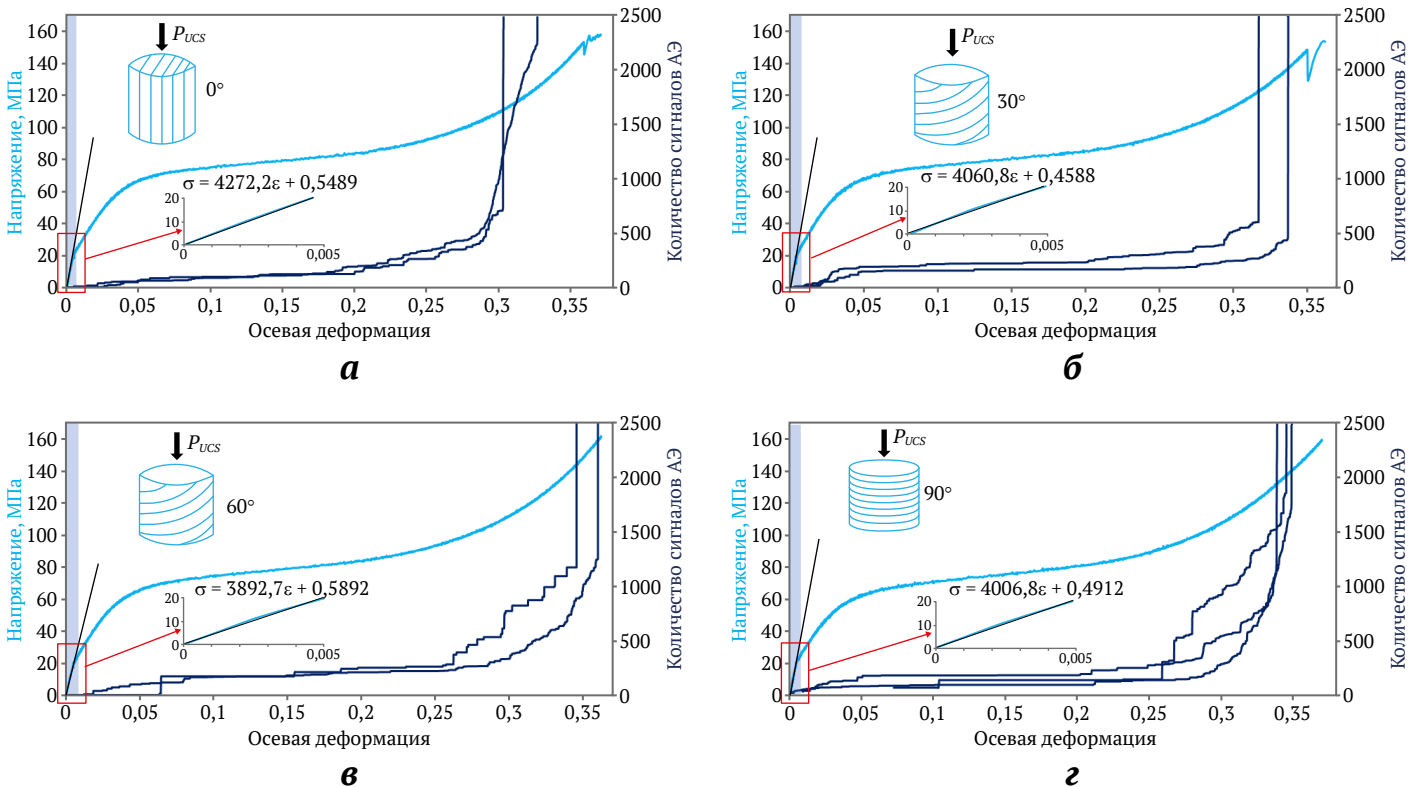


Рис. 5. Кривые зависимости деформация–напряжение и суммарного сигнала АЭ для образцов с углом наклона слоев 0° (а), 30° (б), 60° (в) и 90° (з). Голубая линия – напряжение, синяя линия – суммарное количество сигналов АЭ. Зона квазиупругой деформации выделена голубым цветом

По результатам испытаний получены кривые «напряжение–деформация» и зависимости суммарного сигнала АЭ (см. рис. 5). Кривые «напряжение–деформация» описывают упруго-вязкопластическое поведение образцов. При нагружении до 20 МПа во всех образцах наблюдается зона квазиупругой деформации (выделена синим на рис. 5), в которой напряжение линейно зависит от деформации. В этой зоне сигналы АЭ, превышающие пороговое значение фильтра 40 дБ, отсутствуют, что свидетельствует о низкой интенсивности внутреннего разрушения либо его отсутствии.

Зона квазиупругой деформации представляет наибольший инженерный интерес, поскольку в упругой области элементы конструкций сохраняют свои механические свойства. По касательной к кривой «напряжение–деформация» в упругой зоне определены значения модуля Юнга для образцов с различной ориентацией слоев. Зависимости напряжения от деформации в этой области описываются уравнениями:

$$\sigma_0 = 4272,2\epsilon_\alpha + 0,5489; \quad (1)$$

$$\sigma_{30} = 4060,8\epsilon_\alpha + 0,4588; \quad (2)$$

$$\sigma_{60} = 3892,7\epsilon_\alpha + 0,5892; \quad (3)$$

$$\sigma_{90} = 4006,8\epsilon_\alpha + 0,4912, \quad (4)$$

где σ – напряжение, МПа (индекс соответствует углу между слоями и вектором нагрузки); ϵ_α – осевая деформация.

Коэффициенты в правой части уравнений соответствуют модулям Юнга и находятся в диапазоне от 3893 МПа (образцы с углом наклона слоев 60°) до

4272 МПа (образцы с параллельными нагрузке слоями). Полученные значения свидетельствуют о достаточно высокой однородности упругих свойств образцов при напряжениях до 20 МПа.

Наибольший модуль Юнга зафиксирован у образцов со слоями, параллельными вектору нагрузки; наименьший – у образцов с наклоном слоев 60°. Прслеживается общая тенденция к снижению модуля упругости с увеличением угла ориентации слоев относительно оси образца (формулы (1)–(4)). При этом модуль Юнга образцов с перпендикулярными нагрузке слоями (90°) сопоставим со значениями для образцов с наклоном 30°.

Образцы с ориентацией слоев 0 и 30° продемонстрировали низкую прочность, но высокий модуль Юнга в зоне квазиупругого деформирования, что указывает на их повышенную жесткость при относительно хрупком разрушении. Напротив, образцы с углом наклона слоев 60°, обладая наибольшей прочностью, показали минимальные значения модуля Юнга и, соответственно, меньшую жесткость. Выявленное несоответствие между прочностными характеристиками и модулем упругости предполагает реализацию различных механизмов разрушения в зависимости от ориентации слоев.

Сравнительный анализ данных АЭ и одноосного сжатия (см. рис. 5) показал, что несмотря на схожий вид кривых деформация–напряжение механизмы разрушения образцов с различными углами наклона слоев относительно вектора нагрузки различаются.

Сопоставляя данные сигналов АЭ и одноосного сжатия, можно с точностью определить, в зоне каких деформаций находится образец при данном значении нагружения. Сравнив полученные данные, можно заметить, что продолжительности нахождения образцов в каждой зоне зависят от угла наклона слоев относительно вектора нагружения. Например, наибольшая продолжительность упруго-вязкопластической зоны наблюдается в образцах с перпендикулярными слоями (рис. 5, з), наименьшая – с углом наклона слоев 30° к оси нагрузки (рис. 5, б). Таким образом, сравнительный анализ данных АЭ и одноосного сжатия показал, что в геомеханических исследованиях необходимо учитывать, что разные механизмы разрушения реплик образцов горных пород, напечатанных 3D-LCD-методом, различаются в зависимости от угла слоев.

3.4. Одноосное сжатие горных пород

Результаты испытаний горных пород на одноосное сжатие представлены на рис. 6 в виде кривых зависимости деформации от напряжения.

Установлено, что во всех образцах горных пород в начальный период нагружения наблюдается зона уплотнения, в которой напряжение нелинейно возрастает с деформацией (см. рис. 6). Эта зона обусловлена наличием релаксационных микротрещин, ориентированных перпендикулярно главному напряжению и, как правило, параллельно напластованию. Закрытие таких трещин при нагружении происходит без разрушения, что подтверждается отсутствием акустических сигналов. В процессе закрытия микротрещин

материал упрочняется, а угол наклона касательной к кривой деформация–напряжение увеличивается.

Из-за неравномерного распределения напряжений часть микротрещин остается незакрытой, кроме того, могут образовываться новые. При достижении деформации 0,001 перераспределение напряжений приводит к резкому всплеску интенсивности сигналов АЭ. Последующее увеличение нагрузки способствует закрытию как релаксационных, так и вновь образовавшихся микротрещин, в результате чего образец практически полностью уплотняется и начинается упругая стадия деформирования.

Зона упругих деформаций во всех образцах характеризуется линейным ростом напряжения от деформации и отсутствием (либо слабой интенсивностью) сигналов АЭ. Наименьшая интенсивность АЭ отмечена в образцах силицита, выбуренных перпендикулярно напластованию (рис. 6, а). В образцах силицита с плоскостью напластования, параллельной вектору нагрузки, а также в доломитах и опоках несмотря на линейность участка кривой деформация–напряжение в зоне упругих деформаций интенсивность АЭ остается достаточно высокой (рис. 6, б, з).

Касательные к кривым деформация–напряжение в упругой зоне описываются уравнениями:

$$\sigma_1 = 6775,7\varepsilon_\alpha - 5,64; \quad (5)$$

$$\sigma_2 = 6144,5\varepsilon_\alpha - 0,85; \quad (6)$$

$$\sigma_3 = 14609,0\varepsilon_\alpha - 34,70; \quad (7)$$

$$\sigma_4 = 2480,3\varepsilon_\alpha - 0,95. \quad (8)$$

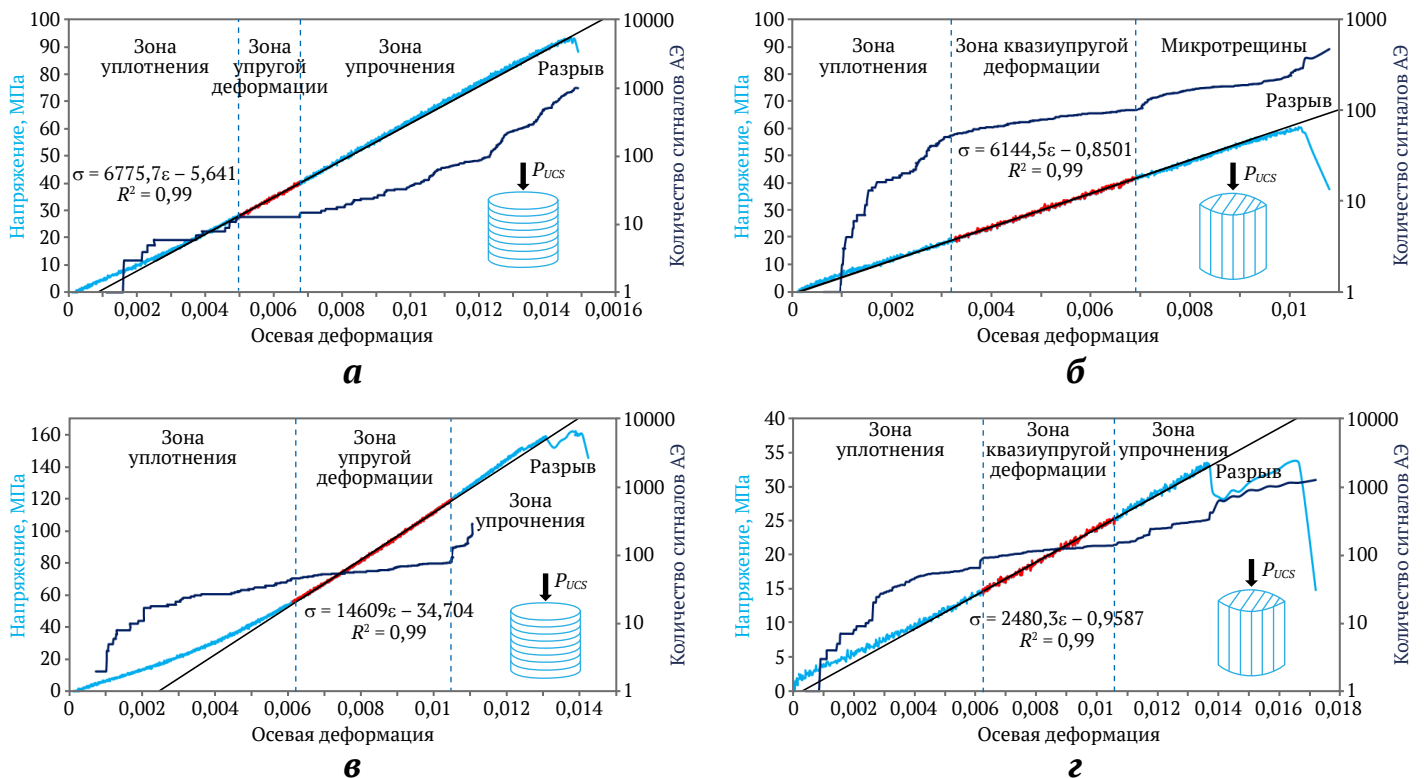


Рис. 6. Кривые зависимости деформация–напряжение и суммарного сигнала АЭ для образцов горных пород: а – силициты (перпендикулярно напластованию); б – силициты (параллельно напластованию); в – окремненные доломиты; з – опока. Голубая линия – напряжение, синяя линия – суммарное количество сигналов АЭ. Красная линия – зона упругой деформации, касательная к ней использована для расчета модуля Юнга

Индекс соответствует группе образцов. Коэффициенты в правой части уравнений – модули Юнга образцов.

После упругой деформации интенсивность микрорастрескивания образцов возрастает, что отражается в значительном увеличении общего числа сигналов АЭ. Одновременно с микрорастрескиванием происходит упрочнение образцов (зона упрочнения) и отмечается увеличение наклона кривой деформация–напряжение (см. рис. 6, а, в, г). В образцах силицитов, выбуренных параллельно плоскости напластования, микрорастрескивание приводит к деградации механических свойств (падение кривой) (см. рис. 6, б). В результате после превышения предела прочности все образцы разрушаются.

Наибольшую прочность при одноосном сжатии показали образцы, выбуренные перпендикулярно напластованию: силициты – 117 МПа, кремненные доломиты – 186 МПа. Наименьшая прочность зафиксирована у образцов, выбуренных параллельно напластованию: силициты – 86 МПа, опоки – 51 МПа. Образцы с перпендикулярным напластованием также продемонстрировали наибольшие суммарные деформации (см. рис. 6, а, в), что обусловлено ориентацией релаксационных трещин перпендикулярно вектору нагрузки.

4. Обсуждение

Влияние особенностей 3D-LCD-печати, угла и ориентации слоев на анизотропию. LCD-метод 3D-печати обусловлен послойным характером изготовления моделей, что приводит к формированию слоистой структуры готовых изделий. Такая структура может вызывать анизотропию свойств напечатанных образцов в зависимости от угла печати. Однако проведенные исследования показали, что данные особенности не оказывают влияния на однородность упругих свойств, измеренных методами неразрушающего контроля, а также при одноосном сжатии в диапазоне напряжений до 20 МПа. Анизотропия материала, связанная с углом и ориентацией слоев, начинает проявляться лишь при превышении указанного порога.

Сравнение горных пород и реплик. Несмотря на различные углы и ориентацию слоев реплики гор-

ных пород демонстрируют относительную однородность, что подтверждается сходной формой кривых деформация–напряжение. В природных горных породах анизотропия обусловлена условиями залегания пластов и существенно влияет на механические характеристики при нагружении.

Для оценки возможности использования реплик в качестве аналогов горных пород были выбраны материалы с различной прочностью: однородные прочные породы (силициты и кремненные доломиты) и слабая опока. Результаты испытаний показали, что даже породы с высокой степенью структурной однородности обладают заметной анизотропией механических свойств.

Сравнительный анализ кривых деформация–напряжение показал, что модули Юнга реплик ниже, чем у доломитов и силицитов, но выше, чем у опоки. При этом зона упругой деформации реплик совпадает с областью упругих деформаций пород (рис. 7). Таким образом, реплики могут рассматриваться как аналоги горных пород, но лишь в диапазоне напряжений, не превышающем предела упругости.

При напряжениях свыше 40 МПа в репликах начинается микроразрушение и вследствие особенностей их структуры наблюдается расхождение кривых деформация–напряжение. Большие деформации реплик по сравнению с горными породами обусловлены преобладанием когезионных связей и крайне слабым внутренним трением. Из-за отсутствия внутреннего трения слои скользят между собой без значительного сопротивления – это связано с полимерной природой смолы, не содержащей твердых частиц.

Тем не менее реплики демонстрируют прочность на одноосное сжатие, сопоставимую с прочностью горных пород, а в некоторых случаях и превосходящую ее. В зависимости от угла наклона слоев прочность реплик составляет от 138 до 162 МПа, тогда как у горных пород этот показатель варьируется от 51 до 186 МПа. При этом перед разрушением в репликах накапливаются значительные деформации – до 0,37, а образцы принимают бочкообразную форму (рис. 8, б). В горных породах деформации даже после разрушения едва заметны (рис. 8, г, д) и не превышают 0,015.

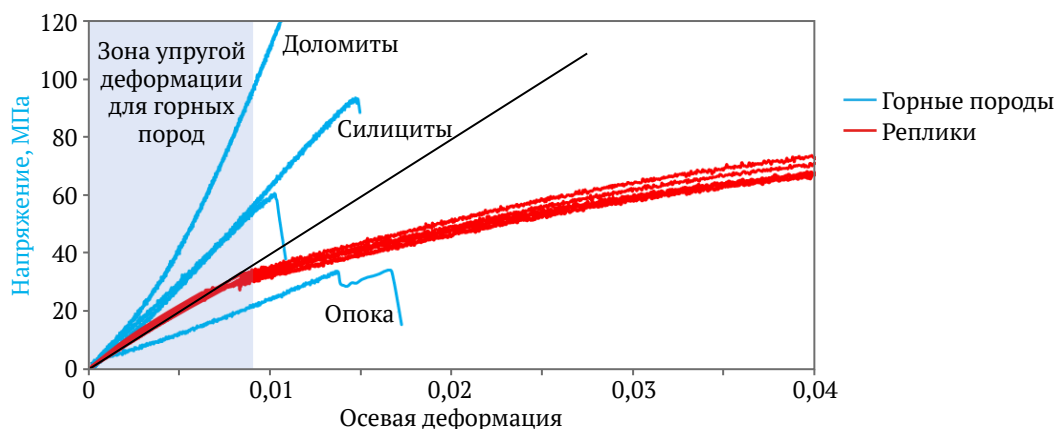


Рис. 7. Кривые деформация–напряжение для горных пород (синяя линия) и реплик (красная линия).

Закрашенная область – зона упругой деформации для горных пород.

Черная линия – касательная к кривым деформация–напряжение реплик

Микрофотографии поверхностей сколов (рис. 9) показывают, что реплика имеет гладкую поверхность разрушения – ничто не препятствует скольжению слоев и росту микротрещин. Мелкозернистая структура горных пород, напротив, обеспечивает высокую когезию и значительное внутреннее трение благодаря зернистому строению. Это препятствует плавному распространению трещин, поэтому поверхности сколов пород неровные, «рваные» (рис. 9, б).

Характер разрушения образцов горных пород не обнаруживает выраженной зависимости от угла напластования в отличие от реплик. Силициты, выбуренные перпендикулярно и параллельно напластованию, демонстрируют сходный тип разрушения с крупной фрагментацией и продольными магистральными трещинами, распространяющимися к торцам (рис. 10, а, б). Доломиты и опока несмотря на различие в прочности и угле напластования (рис. 10, в, г) проявляют высокую хрупкость, что выражается в значительной фрагментации. Обилие трещин на торцах этих образцов свидетельствует о преобладании хрупкого механизма разрушения над пластичным.

В репликах с ориентацией слоев 0° также наблюдается множество трещин на торцах, однако в отличие от пород они образуются в результате расслоения и характерны только для этих образцов. В репликах

с углом наклона слоев 60 и 90° , где ранее были зафиксированы зоны длительного упрочнения, продольных хрупких трещин на торцах не обнаружено, что подтверждает преимущественно пластичный характер разрушения таких образцов.

Таким образом, в результате исследований механических свойств реплик и горных пород установлено, что метод 3D-LCD-печати пригоден для изготовления и исследования геомеханических характеристик породоподобных образцов при незначительных нагрузках, не приводящих к внутреннему разрушению. Реплики, напечатанные методом 3D-LCD, не являются полными аналогами горных пород и не могут полностью заменить изучение реальных горных пород, особенно при исследованиях, предполагающих разрушение. Для того чтобы использовать метод 3D-LCD-печати для создания реплик горных пород при исследованиях, предполагающих их разрушение, необходимо в первую очередь решить вопрос внутреннего трения материала, которое отсутствует. Однако использование данного метода репликации для изучения чисто упругого нагружения позволит оценить геомеханические характеристики и поведение горных пород с различными особенностями строения, которые можно регулировать в широком диапазоне.

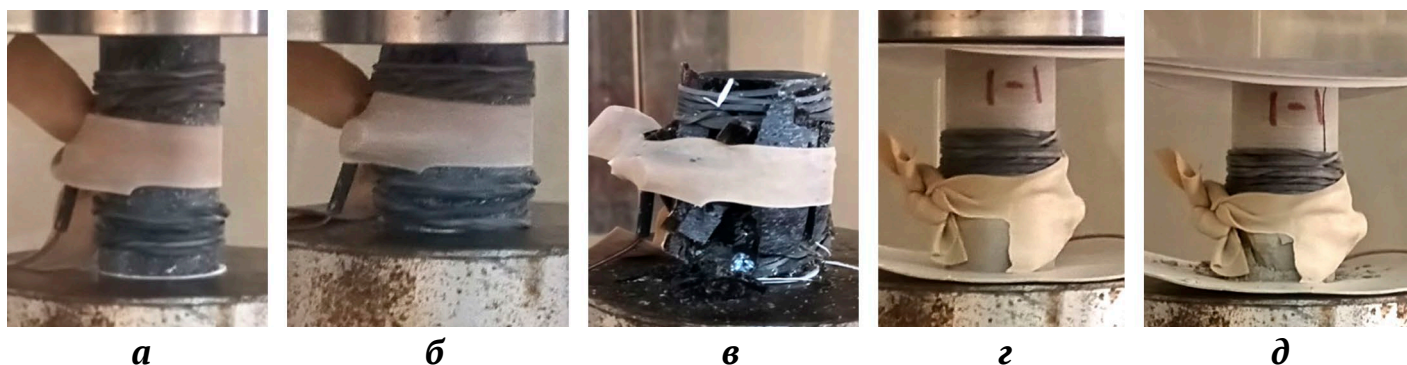
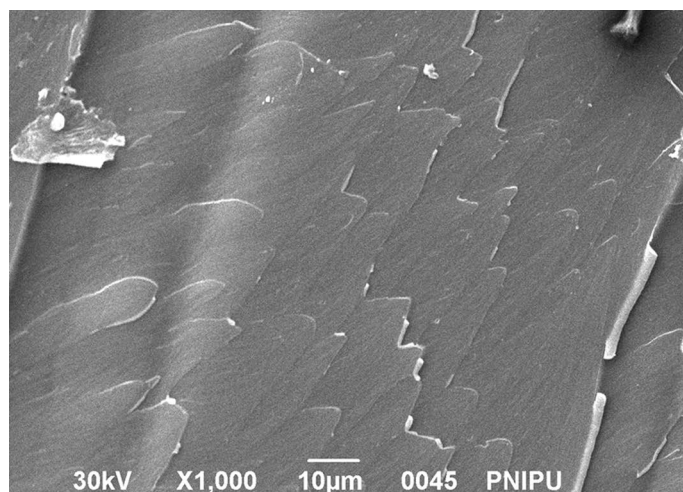
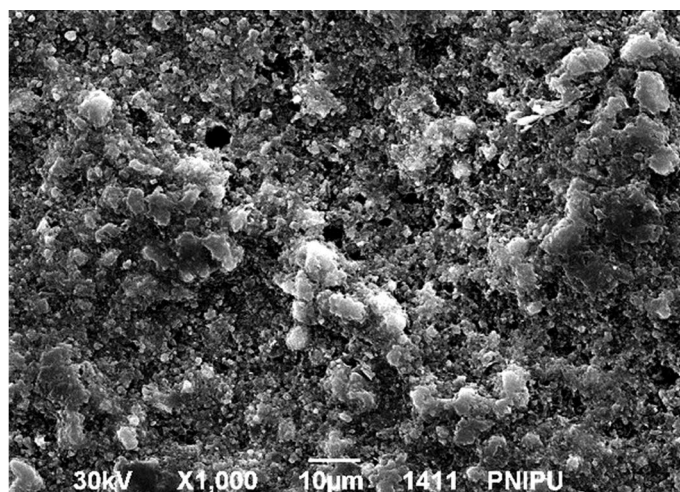


Рис. 8. Фотографии образцов под нагрузкой:
а, с – реплика и порода до нагрузки; б – реплика до разрушения; в, д – разрушенные реплика и порода



а



б

Рис. 9. Микрофотографии поверхностей сколов образцов: а – реплика; б – силицит

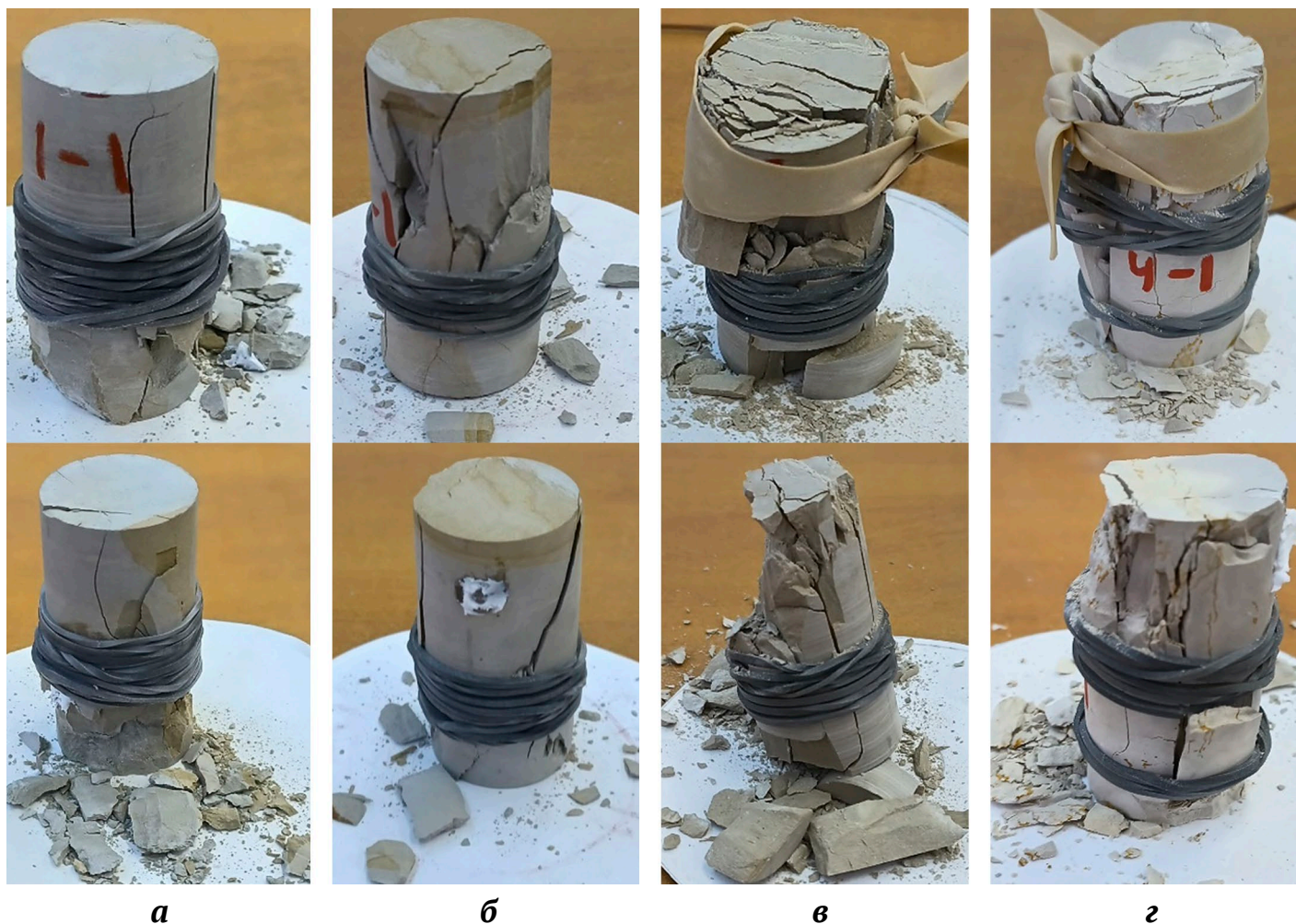


Рис. 10. Образцы горных пород после испытания на одноосное сжатие. Образцы, выбуренные перпендикулярно (а, в) и параллельно напластованию (б, г)

5. Практическое применение результатов

Результаты выполненного исследования обладают высоким прикладным потенциалом и могут быть непосредственно использованы в горнодобывающей, нефтегазовой и строительной отраслях при проведении лабораторных геомеханических испытаний. Полученные данные подтверждают, что технология 3D-LCD-печати обеспечивает возможность серийного и экономически эффективного изготовления реплик горных пород с воспроизводимыми физико-механическими характеристиками. Это позволяет заменить дефицитный керновый материал и существенно снизить затраты на полевые буровые работы, транспортировку и хранение дорогостоящих образцов.

Использование 3D-реплик горных пород повышает производительность экспериментальных исследований благодаря отказу от затратных и длительных процедур отбора и подготовки природных образцов. Экономический эффект достигается за счет сокращения себестоимости и временных затрат на проведение испытаний, а также благодаря возможности многократного воспроизводства идентичных образцов для параллельных экспериментов.

Практическое внедрение разработанного подхода позволяет формировать физические модели породных массивов для оценки устойчивости выработок, расчета параметров бурения, прогноза трещинообразования и фильтрационных характеристик коллекторов. Кроме того, результаты могут применяться при разработке цифровых полигонов и верификации численных геомеханических моделей. Таким образом, использование 3D-LCD-реплик горных пород способствует снижению экспериментальных затрат, повышению точности инженерных прогнозов и ускорению стадий проектирования в горной и нефтегазовой промышленности.

Технология 3D-LCD-печати может эффективно применяться не только для изготовления реплик образцов горных пород, но и для физического моделирования в лабораторных условиях различных горных объектов: при оценке устойчивости горных выработок и подземных сооружений, расчете несущей способности опор и целиков, а также для оптимизации их формы и расположения. Это открывает новые возможности для ускоренной и экономичной отработки проектных решений в горном деле и строительстве.



Заклучение

По результатам проведённого экспериментально-го исследования подтверждена возможность применения технологии 3D-LCD-печати для создания реплик горных пород, пригодных для физического моделирования их геомеханического поведения при упругом нагружении. Поставленная в работе цель достигнута, а сформулированные задачи решены в полном объёме.

В ходе исследований установлено, что оптимальное время постотверждения фотополимерного материала составляет 4 мин, что обеспечивает полную полимеризацию без дальнейшого изменения механических характеристик. Показано, что полученные образцы демонстрируют изотропию упругих свойств: различия в скоростях распространения продольных и поперечных волн в аксиальном и радиальном направлениях не превышают ошибки измерения. Модуль Юнга, определённый по данным неразрушающих испытаний и тестов на одноосное сжатие, для печатных реплик находится в диапазоне 3,89–4,27 ГПа, что сопоставимо с аналогичными значениями для природных силицитов и доломитов.

Экспериментально выявлено влияние ориентации печатных слоёв на прочность образцов: при угле 60° зафиксирована наибольшая прочность (в среднем 158 МПа), тогда как при 30° – минимальная (138 МПа). Механические испытания сопровождались регистрацией акустической эмиссии, что позволило установить различие механизмов разрушения в зависимости от угла наслоения.

Сравнение с результатами для природных горных пород показало схожие закономерности деформационного поведения при упругом нагружении, подтверждая адекватность использования 3D-LCD-реплик при моделировании геомеханических процессов. Научная новизна работы заключается в количественном установлении зависимостей модулей упругости и пределов прочности от угла ориентации слоёв, а также в экспериментальном подтверждении изотропности и стабильности упругих свойств фотополимерных реплик. Полученные данные расширяют область применения 3D-LCD-печати в геотехнических исследованиях и демонстрируют её высокую воспроизводимость и экономическую эффективность.

Список литературы / References

1. Johnson P.R., Copeland P.M., Ayodele A.O. et al. In-vacuum performance of a 3D-printed ion deflector. *Vacuum*. 2020;172:109061. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109061>
2. Dong D., Su H., Li X. et al. Microstructures and mechanical properties of biphasic calcium phosphate bioceramics fabricated by SLA 3D printing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;81:433–443. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.016>
3. Khimulia V., Karev V., Kovalenko Y., Barkov S. Changes in filtration and capacitance properties of highly porous reservoir in underground gas storage: CT-based and geomechanical modeling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024;16(8):2982–2995. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.12.015>
4. Riabokon E., Gladkikh E., Turbakov M. et al. Effects of ultrasonic oscillations on permeability of rocks during the paraffinic oil flow. *Geotechnique Letters*. 2023;13(3):151–157. <https://doi.org/10.1680/jgele.22.00137>
5. Hodder K.J., Sanchez-Barra A.J., Ishutov S. et al. Increasing density of 3D-printed sandstone through compaction. *Energies*. 2022;15(5):1813. <https://doi.org/10.3390/en15051813>
6. Wu H., Ju Y., Han X. et al. Size effects in the uniaxial compressive properties of 3D printed models of rocks: an experimental investigation. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022;9:83. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00556-3>
7. Cheng P., Wang K., Peng Y. et al. A novel 3D printed continuous ramie fiber reinforced variable stiffness bio-composite honeycomb structure. *Vacuum*. 2023;215:112301. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112301>
8. Wu Z., Zhang B., Weng L. et al. A new way to replicate the highly stressed soft rock: 3D printing exploration. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020;53:467–476. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01926-1>
9. Wang Y., Wang L., Zhang W., Ma G. Size effect of fractured rock mass based on 3D printed model testing. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022;55:7005–7020. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03013-4>
10. Zhang K., Zhang K., Ye J. et al. An improved sand 3D printing method for better reproduction of high-strength and high-brittleness rock mechanical properties is proposed. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;26:5037–5054. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.204>
11. Sharafisafa M., Shen L. Experimental investigation of dynamic fracture patterns of 3D printed rock-like material under impact with digital image correlation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020;53:3589–3607. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02115-1>
12. Song R., Wang Y., Ishutov S. et al. A comprehensive experimental study on mechanical behavior, microstructure and transport properties of 3D-printed rock analogs. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020;53:5745–5765. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02239-4>
13. Shi D., Hou Y., Gao G. Effect of printing parameters on properties of 3D printing sand samples. *China Foundry*. 2023;20:553–562. <https://doi.org/10.1007/s41230-023-3002-9>
14. Morettini G., Palmieri M., Capponi L., Landi L. Comprehensive characterization of mechanical and physical properties of PLA structures printed by FFF-3D-printing process in different directions. *Progress in Additive Manufacturing*. 2022;7:1111–1122. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00285-8>



15. Izdebska-Podsiadły J. Chapter 3 – Classification of 3D printing methods. In: Izdebska-Podsiadły J. (Ed.) *Polymers for 3D Printing*. William Andrew (Elsevier); 2022. Pp. 23–34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818311-3.00009-4>
16. Vidhu N., Gupta A., Salajeghe R. et al. A computational model for stereolithography apparatus (SLA) 3D printing. *Progress in Additive Manufacturing*. 2023;9:1605–1619. <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00525-5>
17. Yu Z., Li X., Zuo T. et al. High-accuracy DLP 3D printing of closed microfluidic channels based on a mask option strategy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;127:4001–4012. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11769-4>
18. Saitta L., Tosto C., Pergolizzi E. et al. Liquid Crystal Display (LCD) printing: a novel system for polymer hybrids printing. In: *Macromolecular Symposia. Progress on Polymers and Composites Products and Manufacturing Technologies – POLCOM 2020*. 2021;395(1):2000254. <https://doi.org/10.1002/masy.202000254>
19. Chen S., Zhang J., Yin D. et al. Visualizing experimental investigation on gas-liquid replacements in a micro-heat model using the reconstruction method. *Deep Underground Science and Engineering*. 2023;2(3):295–303. <https://doi.org/10.1002/dug2.12044>
20. Katheng A., Prawatvatchara W., Chaiamornsop P. et al. Comparison of mechanical properties of different 3D printing technologies. *Scientific Reports*. 2025;15:18998. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03632-1>
21. Dulieu-Barton J.M., Fulton M.C. Mechanical properties of a typical stereolithography resin. *Strain*. 2000;36(2):81–87. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2000.tb01177.x>
22. Puebla K., Arcaute K., Quintana R., Wicker R. B. Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*. 2012;18(5):374–388. <https://doi.org/10.1108/13552541211250373>
23. Chen Q., Zou B., Lai Q. et al. Influence of irradiation parameters on the curing and interfacial tensile strength of HAP printed part fabricated by SLA-3D printing. *Journal of the European Ceramic Society*. 2022;42(14):6721–6732. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.07.019>
24. Rehbein T., Johlitz M., Lion A. et al. Temperature- and degree of cure-dependent viscoelastic properties of photopolymer resins used in digital light processing. *Progress in Additive Manufacturing*. 2021;6:743–756. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00194-2>
25. Shirinbayan M., Zirak N., Saddaoui O. et al. Effect of build orientation and post-curing of (meth)acrylate-based photocurable resin fabricated by stereolithography on the mechanical behavior from quasi-static to high strain rate loadings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;123:1877–1887. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10336-7>
26. Lee J.H., Prud'homme R.K., Aksay I.A. Cure depth in photopolymerization: experiments and theory. *Journal of Materials Research*. 2001;16:3536–3544. <https://doi.org/10.1557/JMR.2001.0485>
27. Lee E.-D., Sim J.-H., Kweon H.-J., Paik I.-H. Determination of process parameters in stereolithography using neural network. *KSME International Journal*. 2004;18:443–452. <https://doi.org/10.1007/BF02996109>
28. Li Y., Teng Z. Effect of printing orientation on mechanical properties of SLA 3D-printed photopolymer. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2024;47(5):1531–1545. <https://doi.org/10.1111/ffe.14265>
29. Monzón M., Ortega Z., Hernández A. Anisotropy of photopolymer parts made by digital light processing. *Materials*. 2017;10(1):64. <https://doi.org/10.3390/ma10010064>
30. Farkas A.Z., Galatanu S.-V., Nagib R. The influence of printing layer thickness and orientation on the mechanical properties of dlp 3d-printed dental resin. *Polymers*. 2023;15(5):1113. <https://doi.org/10.3390/polym15051113>
31. Saini J., Dowling L., Kennedy J., Trimble D. Investigations of the mechanical properties on different print orientations in SLA 3D printed resin. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020;234(11):2279–2293. <https://doi.org/10.1177/0954406220904106>
32. Keßler A., Hickel R., Ilie N. In vitro investigation of the influence of printing direction on the flexural strength, flexural modulus and fractographic analysis of 3D-printed temporary materials. *Dental Materials Journal*. 2021;40(3):641–649. <https://doi.org/10.4012/dmj.2020-147>
33. Pandzic A. Influence of Layer height, build orientation and post curing on tensile mechanical properties of SLA 3D printed material. In: Katalinic B. (Ed.) *32nd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. Vienna, Austria: DAAAM International; 2021. Pp. 0200–0208. <https://doi.org/10.2507/32nd.daaam.proceedings.030>
34. Cosmi F., Dal Maso A. A mechanical characterization of SLA 3D-printed specimens for low-budget applications. *Materials Today: Proceedings*. 2020;32(Part 2):194–201. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.602>
35. Quagliato L., Kim S.Y., Ryu S.C. Quasi-ductile to brittle transitional behavior and material properties gradient for additively manufactured SLA acrylate. *Materials Letters*. 2022;329:133121. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133121>



Информация об авторах

Евгений Васильевич Кожевников – кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-6084-0795, Scopus ID 55531698200, SPIN-код 3914-7370; e-mail kev@pstu.ru

Михаил Сергеевич Турбаков – кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий, ведущий сотрудник лаборатории природных газовых гидратов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-9336-5847, Scopus ID 36443127500, ResearcherID A-5611-2014, SPIN-код 1613-8284; e-mail msturbakov@pstu.ru

Захар Григорьевич Иванов – лаборант кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0009-0001-7957-8280, Scopus ID 59022877200, SPIN-код 1511-2857; e-mail zakharivanov@pstu.ru

Евгений Павлович Рябоконт – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-0555-3977, Scopus ID 56006175100, SPIN-код 8783-5060; e-mail riabokon@pstu.ru

Павел Александрович Каменев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и региональной геологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-9934-5855, Scopus ID 57193337193, SPIN-код 6271-5797; e-mail p.kamenev@imgg.ru

Information about the authors

Evgenii V. Kozhevnikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0002-6084-0795, Scopus ID 55531698200, SPIN 3914-7370; e-mail kev@pstu.ru

Mikhail S. Turbakov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Department of Oil and Gas Technologies, Leading Researcher at the Laboratory of Natural Gas Hydrates, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0002-9336-5847, Scopus ID 36443127500, ResearcherID A-5611-2014, SPIN 1613-8284; e-mail msturbakov@pstu.ru

Zakhar G. Ivanov – Laboratory Assistant at the Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID 0009-0001-7957-8280, Scopus ID 59022877200, SPIN 1511-2857; e-mail zakharivanov@pstu.ru

Evgenii P. Riabokon – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer at the Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0003-0555-3977, Scopus ID 56006175100, SPIN 8783-5060; e-mail riabokon@pstu.ru

Pavel A. Kamenev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Laboratory of Geochemistry and Regional Geology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation; ORCID 0000-0002-9934-5855, Scopus ID 57193337193, SPIN 6271-5797; e-mail p.kamenev@imgg.ru

Поступила в редакцию	10.02.2025	Received	10.02.2025
Поступила после рецензирования	05.12.2025	Revised	05.12.2025
Принята к публикации	10.12.2025	Accepted	10.12.2025