



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки).
УДК 620.181.4:678.8:620.193.21

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.043

EDN:KPZWJY

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА СУТОЧНЫХ И СЕЗОННЫХ ТЕРМОЦИКЛОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ПКМ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Айсен Леонидович Терешкин ¹, Александр Александрович Габышев ²,
Анна Андреевна Гаврильева ³, Ирина Григорьевна Лукачевская ⁴

^{1,3,4} Якутский научный центр СО РАН, Якутск, Россия

¹ aistereshkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6763-1080>

³ gav-ann@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5919-495X>

⁴ mirkin1611@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0886-7050>

² Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск, Россия

² pilp77@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2734-6554>

Аннотация. В статье исследуются суточные и сезонные термоциклы, происходящие на поверхностях полимерных композиционных материалов в условиях холодного климата в г. Якутске. Основное внимание в исследовании уделяется на переходы через определенные температурные точки перехода «замерзания–оттаивания» 0, –18 и –33 °С в зависимости от размеров влаги. Установлено, что температурная амплитуда на поверхностях образцов за сутки достигала до 40 °С. Полученные результаты подтверждают, что в условиях холодного климата г. Якутска ПКМ подвергаются многократному циклу «замерзания–оттаивания». Внутренние напряжения происходят из-за различий коэффициентов термического расширения волокон и полимерной матрицы не только при сезонных, но и суточных колебаниях температуры. Вследствие чего ускоряется образование микротрещин, их слияние и формирование макроповреждений на поверхностях композитных материалов. Тем самым происходящие термоциклы «замерзание–оттаивание» являются одним из основных факторов снижения прочностных характеристик ПКМ, и их необходимо учитывать при конструировании ПКМ для условий холодного климата.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, холодный климат, термоциклирование, внутренние напряжения, деградация, углепластик, стеклопластик, базальтопластик.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-69-00009, <https://rscf.ru/project/25-69-00009/>.

Для цитирования: Исследование количества суточных и сезонных термоциклов на поверхностях ПКМ в условиях холодного климата / А. Л. Терешкин [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 1. С. 270–274. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.043. EDN: <https://elibrary.ru/KPZWJY>.

Original article

INVESTIGATION OF NUMBER OF DAILY AND SEASONAL THERMOCYCLES ON PCM SURFACES IN COLD CLIMATE CONDITIONS

Aysen L. Tereshkin ¹, Alexander A. Gabyshev ², Anna A. Gavriliyeva ³,
Irina G. Lukachevskaya ⁴

^{1,3,4} Yakutsk Scientific Centre SB RAS, Yakutsk, Russia

¹ aistereshkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6763-1080>

² Yakutsk Scientific Centre SB RAS, Yakutsk, Russia,

² pilp77@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2734-6554>

³ Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia,

³ gav-ann@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5919-495X>

⁴ mirkin1611@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0886-7050>

Abstract. The paper studies daily and seasonal thermocycles occurring on the surfaces of polymer composite materials under cold climate conditions in Yakutsk. The main attention in the study is paid to the transitions through certain temperature points of freeze-thaw transition 0, –18 and –33 °C depending on the moisture size. It is established that the temperature amplitude on the surfaces of the samples for a day reached up to 40 °C. The obtained results confirm that in the cold climate of Yakutsk, PCM are subjected to multiple freeze-thaw cycles. Internal stresses occur due to differences in thermal expansion coefficients of fibres and polymer matrix not only at seasonal but also daily temperature fluctuations.

© Терешкин А. Л., Габышев А. А., Гаврильева А. А., Лукачевская И. Г., 2026

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА СУТОЧНЫХ И СЕЗОННЫХ ТЕРМОЦИКЛОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ПКМ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

As a consequence, the formation of microcracks, their fusion and the formation of macro-damage on the surfaces of composite materials are accelerated. Thus, the freeze-thaw thermocycles are one of the main factors of reduction of strength characteristics of PCM and it is necessary to take them into account when designing PCM for cold climate conditions.

Keywords: polymer composite materials, cold climate, thermal cycling, internal stresses, degradation, carbon fibre reinforced plastic, glass fibre reinforced plastic, basalt plastic.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-69-00009, <https://rscf.ru/project/25-69-00009/>.

For citation: Tereshkin, A. L., Gabyhev, A. A., Gavrilova, A. A., Lukachevskaya, I. G. (2026). Investigation of number of daily and seasonal thermocycles on PCM surfaces in cold climate conditions. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 270-274. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.043. EDN: <https://elibrary.ru/KPZWJY>.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение арктических регионов привлекает повышенный интерес исследователей к проблемам деградации ПКМ в холодном климате [1, 2, 3]. Согласно примерам [4–7], после экспозиции на открытых стендах в различных климатических условиях, такие как в умеренно холодном, холодном и экстремально холодном климате происходит ухудшение механических показателей ПКМ соизмеримо или более существенней, чем после экспонирования в теплых и влажных регионах.

Одной из главных причин изменения механических показателей ПКМ в холодном климате является воздействие отрицательно низких температур с сезонным и суточным климатическим термоциклированием. В макроклиматическом районе с холодным климатом, такой как в городе Якутск, при среднегодовой температуре $-10,6$ °C в зимний период температура воздуха опускается до отметки в -45 °C, достигая -64 °C [6].

В работах [8, 9] показано модельными экспериментами, что для СП через 150 и более испытаний на циклическое воздействие от -60 до $+60$ °C от уменьшается на 11 %. Для УП при растяжении поперек армирования происходит снижение предела прочности на 6 % за 10 термоциклов. Акустическая эмиссия возрастает при снижении температуры, особенно быстрый рост наблюдается при низких температурах от -40 °C и ниже [8]. Сезонное и суточное климатическое термоциклирование изменяет амплитуду внутренних напряжений и ускоряет появление микротрещин, их слияние и формирование макроповреждений в объеме связующего или на границе с волокнами.

Влияние термоциклирования было изучено авторами [10] в однонаправленных СП, УП, БП на основе эпоксидной матрицы Tufo S. Контроль внутренних напряжений вдоль и поперек направления армирования волокон проводился посредством оптоволоконных датчиков на основе береговой решетки. Образцы испытывались на воздействие смены циклов замораживание и размораживание при температурах -27 и 33 °C по 12 часов. Определено, что напряжения вдоль волокон в УП составили 4 МПа на растяжение при 30 °C и 10 МПа на сжатие при -27 °C. Предел прочности по прошествии 90 термоциклов при растяжении УП уменьшился на 16 %, модуль Юнга – на 18 %. В работе [11] однонаправленные стержни, изготовленные из стеклянных и углеродных волокон на основе винилэфировой матрицы, испытаны на воздействие 250 термоциклов, за один цикл охлаждали до -29 °C и нагревали до 20 °C в течение 12 часов. Предел прочности в итоге снизился при растяжении на 8%.

В композитных материалах наблюдается прямая тенденция по влиянию климатических факторов холодного региона в зависимости от количества содержания структурных дефектов (поры и микропоры)

и количества влаги (в капиллярах). В работе [12] методом ДСК был исследован пористый эпоксидный полимер, где было показано, что содержание количества замерзающей (кристаллизирующейся) воды увеличивается прямо с увеличением объема пор. При этом при малой пористости вода находится в связанном состоянии. Это отражается на температуре замерзания влаги. Например, при снижении значения температуры до -38 °C наблюдается пик поглощения теплового потока. Понижение температуры также отражается в виде экзотермического пика ДСК при низком тепловом потоке в районе -18 °C, а при нагревании заметен эндотермический пик при $0,6-1,0$ °C. Это доказывает необходимость снижения температуры ниже -18 °C для превращения связанной воды в лед в объеме ПКМ, в зависимости от содержания количества пор и влаги.

Влияние холодного климата возрастает для ПКМ, содержащих влагу в капиллярах, порах и микропустотах. Например, в пористом эпоксидном полимере, изученном в работе [12] анализ методом ДСК, доля замерзающей воды возрастает при увеличении пористости. При малой пористости вся вода находится в связанном состоянии. При понижении температуры замерзания свободной и связанной воды выявляется экзотермическим пиком ДСК с минимумом теплового потока при -18 °C, а при нагреве виден эндотермический пик при $0,6-1,0$ °C, связанный с плавлением льда. Пик поглощения теплового потока, вызванный связанной незамерзающей водой, наблюдается при -38 °C. Этот результат доказывает, что для превращения воды в лед в объеме ПКМ в зависимости от количества содержащейся влаги и размеров пор требуется снижать температуру до -18 °C и более.

При снижении температуры окружающей среды микроскопическая вода, находящаяся в объемах пор ПКМ, не кристаллизуется, а переходит в стекловидное состояние [13]. Такие переходы могут вызвать внутренние напряжения в материале, которое можно отразить соотношением [14]:

$$QdT/T = -V/dP, \quad (1)$$

где $Q = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг – скрытая теплота плавления льда; T – абсолютная температура замерзания воды; V – удельный объем льда; P – давление, создаваемое льдом.

С понижением температуры на 1 °C давление увеличивается на $1,13$ МПа. То есть, например при снижении температуры воздуха до -40 °C, внутреннее напряжение ПКМ [10] может повыситься до 45 МПа, что может влиять на образование микротрещин на образцах и уменьшения kR .

Размеры атмосферной влаги, или влажность воздуха, зависят от температуры климата, так как способность воздуха удерживать водяной пар увеличивается с ростом температуры. В холодном климате капли влаги, как правило, меньше, чем в теплом из-за ограниченной способности холодного воздуха удерживать

живать водяной пар и медленных процессов конденсации. В холодном климате воздух содержит меньше водяного пара, и относительная влажность может быть высокой даже при низкой абсолютной влажности. И в зависимости от размеров капель влаги температура замерзания будет различна. Наноразмерные капли воды могут замерзать при значительно более низких температурах, чем обычная вода (0 °C при нормальных условиях) [15]. Это связано с тем, что в малых объемах вероятность образования центров кристаллизации (нуклеации) снижается. Температура замерзания около –33 °C для капель размером 5 нм согласуется с теоретическими моделями и экспериментальными данными, полученными в последние годы. И в данном контексте необходимо рассматривать поглощение влаги материалами в различных формах, основными из которых являются «связанная вода» и «капиллярная влага». «Связанная вода» прочно удерживается силами взаимодействия с материалом на молекулярном уровне, не может свободно перемещаться [16]. Она адсорбируется из воздуха за счет сил поверхностного притяжения, а также может входить в состав полимерных структур. «Капиллярная влага» – это вода, удерживаемая в порах и капиллярах материала за счет капиллярных сил (поверхностного натяжения). Может перемещаться внутри материала, испаряется легче, чем связанная вода. И замерзает при температурах уже ниже 0 °C, что может вызывать разрушение материала. Вся последовательность поглощения влаги материалом сводится именно к превращению данных типов: сначала материал адсорбирует «связанную воду» (например, гигроскопическую). При дальнейшем увлажнении, когда связанная вода уже насытила поверхность, появляется «капиллярная влага», заполняющая поры. При этом связанная вода влияет на механические свойства (прочность, упругость). А капиллярная влага может вызывать коррозию, плесень или разрушение при замерзании. Таким образом, связанная вода и капиллярная влага отражают разные этапы взаимодействия материала с водой, от молекулярного связывания до заполнения пор, и играют важную роль в его поведении при увлажнении и высыхании.

Поэтому целью данной работы является исследование происходящих сезонных и суточных термочиклов на поверхностях экспонированных СП и УП в условиях холодного климата.

МЕТОДЫ

Исследуемыми образцами ПКМ выбраны углепластик (УП), базальтопластик (БП) и стеклопластик (СП). Изготовлены в форме квадратной пластины размером 0,5×0,5 м, толщиной 5,27 мм СП, 5,4 мм (БП) и 5,59 мм УП. Образцы экспонируются на открытой площадке испытательного полигона экспериментальной площадки ИФТПС СО РАН в г. Якутск Республики Саха (Якутия) по ГОСТ 9.708-83. Внешние факторы, такие как повышенная влажность или осадки приводят к резкому изменению механических свойств. Особенно разрушительными являются циклы «влагонасыщение–замораживание», которые в условиях Якутска и приводят к ускоренному старению материалов [17, 18].

Для измерения температуры поверхности образцов, с учетом сезонных изменений температуры окружающей среды, выбраны контактные платиновые

термометры ДТС324-РТ100.А3.41/2. Термодатчики установлены на образцах с солнечной и теневой сторон в центре и с краю угла. Сбор температурных данных проводился с помощью модулей ввода MB210-101 производства «ОВЕН» в автоматическом режиме с опросом каналов каждые 60 мин и с передачей данных на облачный сервер Owen Cloud.



Рисунок 1 – Экспонированные образцы ПКМ на открытом полигоне ИФТПС СО РАН:

а – лицевая сторона, б – теневая сторона образцов

Figure 1 – Exposed PCM samples at the open polygon of IFPTS SB RAS: a - front side, б - shadow side of samples

Данные по температуре окружающего воздуха в г. Якутске взяты с облачного сервиса SOKOL-M, на который автоматическая метеорологическая станция СОКОЛ-M1, расположенная на открытом полигоне, автоматически отправляет метеоданные с интервалом в 20 минут.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Так как месяц март является переходным периодом от отрицательных температур воздуха к положительным, соответственно количество переходов через 0, –18, 33 °C является наибольшим. В марте начинается увеличение солнечного воздействия после солнечного равноденствия и рост количества дневного света.

Количество переходов от отрицательных до плюсовых температур и обратно через 0 °C за выбранный месяц март 2025 года для пластин УП составил 52 раза, для СП – 40. Отметку в –18 °C УП проходил в количестве 56 раз, СП – 52. Через –33 °C для СП – 4 момента перехода, для УП – 8, для БП соответственно 52, 50 и 8 раз. В таблице 1 показано общее количество температурных переходов в сумме за предыдущие 2 года наблюдений.

Таблица 1 – Количество переходов через разные температурные точки

Table 1 – Number of crossings over different temperature points

Год	0 °C			–18 °C			–33 °C		
	СП	БП	УП	СП	БП	УП	СП	БП	УП
2024	225	248	253	137	149	156	87	84	85
2023	213	220	236	125	138	142	76	79	81
Итого	438	468	489	262	287	298	163	163	166

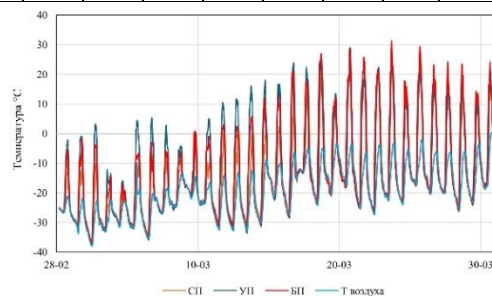


Рисунок 2 – График температуры образцов и воздуха

Figure 2 – Graph of sample and air temperature

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА СУТОЧНЫХ И СЕЗОННЫХ ТЕРМОЦИКЛОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ПКМ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Таблица 2 – Изменение толщины образцов во время экспонирования на открытой площадке

Table 2 – Thickness variation of samples during exposure on an open area

Дата	1.09.2021	20.04.2022	05.09.2022	14.09.2023	18.03.2025
СП	5,27 мм	5,24 мм	5,19 мм	5,22 мм	5,18 мм
УП	5,59 мм	5,36 мм	5,52 мм	5,71 мм	5,52 мм
БП	5,4 мм	5,1 мм	5,22 мм	5,19 мм	5,22 мм
t °С	+8,3	-0,6	+6,5	+6,2	-11,9

Согласно формуле (1), при средней температуре окружающей среды $-19,2$ °С внутреннее напряжение, создаваемое льдом в микротрещинах, составляет 21,7 МПа, что может влиять на толщину материала.

В работе [19] указано, что ПКМ являются умеренно гидрофильными образцами и способны поглощать до 3–5 % воды. В таблице (2) видно, что УП в зависимости от погодных условий толщина материала колеблется в пределах ± 4 %. Для стеклопластика и базальтопластика после уменьшения толщины в первый год такой тенденции не наблюдается, и все изменения находятся в пределах погрешности ± 1 %.

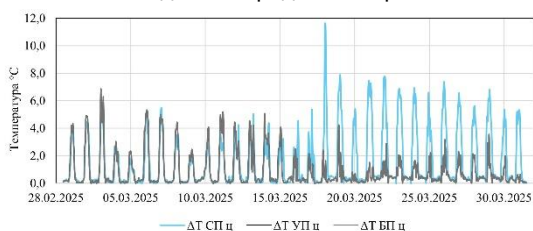


Рисунок 3 – Разница температур между солнечной и теневой сторон образцов

Figure 3 – Temperature difference between the sunny and shady sides of the samples

С повышением температуры окружающей среды разница между солнечной и теневой стороны в образцах УП и БП сокращается, нагреваясь равномерно, в СП же, наоборот, увеличивается. Нагрев БП, УП происходит более равномерно, и разница в температурах между сторонами минимальна.

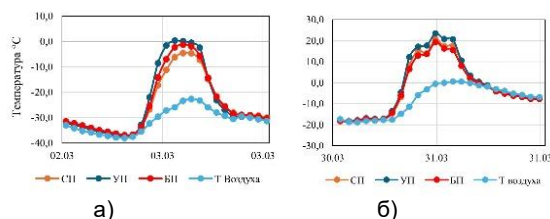


Рисунок 4 – Суточная динамика температур поверхности в образцах СП, БП и УП при минимальной и максимальной температуре окружающего воздуха: а – динамика температуры за 02–03 марта; б – динамика температуры за 30–31 марта

Figure 4 – Daily dynamics of surface temperature in samples SP, BP and UP at minimum and maximum ambient air temperature: a - dynamics of temperature for 02-03 March; b - dynamics of temperature for 30-31 March.

Среднесуточная амплитуда на поверхности образцов составляет ~ 40 °С, такая большая разница связана с интенсивным солнечным нагревом, в ре-

зультате частота циклов заморозания–оттаивания происходит ежедневно. Высокая частота переходов температуры за сутки через отметки 0, -18 и -33 °С с постоянным эффектом заморозания–оттаивания влаги в образцах может вызывать отслоение и изменение не только толщины, но и повлиять в упруго-прочностные свойства образцов. Сравнение результатов исследования и полученных в работах [11, 21] показывает, что при переходе от отрицательных к положительным температурам и обратно ПКМ ухудшают свои механические характеристики. Высокая амплитуда термоциклирования возможна за счет цвета поверхности и конструктивных свойств материалов. Углепластик больше подвержен структурным изменениям из-за большого количества переходов через 0, -18 и -33 °С, что подтверждается изменениями толщины материала. СП и БП менее подвержены такому термоциклу, и изменение толщины несущественна. Также термоциклы создают скачки внутренних напряжений, которые вызывают старение ПКМ из-за образования микротрещин и расслоения, которые ухудшают механические свойства ПКМ, что подтверждается исследованиями в работах [20, 22, 23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что образцы УП и БП больше подвержены солнечному воздействию, вследствие чего увеличивается частота переходов через 0 °С по сравнению с СП. Частые температурные переходы через критические точки приводят к замораживанию–оттаиванию влаги в материале, что вызывает рост внутренних напряжений и ускоряет деградацию. Наибольшее количество термоциклов зафиксировано у УП, что коррелирует с изменениями его толщины ± 4 %. С помощью контактных термометров и метеоданных выявлены суточные колебания температуры поверхности образцов (амплитуда до 40 °С), обусловленные солнечной радиацией. Показано, что УП и БП нагреваются равномернее, чем СП, но чаще подвергаются разрушающим термоциклам. Тем самым при конструировании ПКМ для условий холодного климата необходимо учитывать происходящие термоциклы «заморозание–оттаивание», которые являются одним из основных факторов снижения прочностных характеристик ПКМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно-теплом климате ; дис. ... на соискание ученой степени доктора технических наук / Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. Москва, 2018. 308 с.
2. Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В., Голиков Н.И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Том 1. Якутск, 24–29 июня 2013 г. Якутск, Ахсаан, 2013, С. 5–7.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2. С. 47–58.
4. Baker D.J. Ten-Year Ground Exposure of Composite Materials Used on the Bell Model 206L Helicopter Flight

Service Program // NASA Technical Paper 3468, ARL Technical Report 480. Hampton, Virginia. 1994.

5. Авиационные материалы. Справочник в 13 томах. Том 13. Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов / под ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2015. 270 с.

6. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Гращенков Д.В. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // Труды ВИАМ. 2016. № 6. С. 93–108.

7. Startsev V.O., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Influence of moderately warm and extremely cold climate on properties of basalt plastic armature // Heliyon. 2018. Vol. 4. Article e01060.

8. Dutta P.K. Structural fiber composite materials for cold regions // J. Cold Reg. Eng. 1988. V. 2. P. 124–134.

9. Копырин М.М., Старцев О.В., Лебедев М.П. Прочность углепластика после воздействия зимней температуры в Якутске // Целостность и ресурс в экстремальных условиях: сборник материалов и докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН, Якутск, 19–23 сентября 2024 года. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2024. С. 311–314.

10. Li H., Xian G., Lin Q., Zhang H. Freeze-thaw resistance of unidirectional-fiber-reinforced epoxy composites // Journal of Applied Polymer Science. 2012. V. 123. P. 3781–3788.

11. J.M. Sousa, J.R. Correia, S. Cabral-Fonseca, and A.C. Diogo. Effects of thermal cycles on the mechanical response of pultruded GFRP profiles used in civil engineering applications, Compos. Struct., 116, No. 1, 720–731. (2014).

12. Abdelmola F., Carlsson L.A. State of water in void-free and void-containing epoxy specimens // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2019. V. 26. P. 556–566.

13. Tsotsis T.K. Effects of Sub-Freezing Temperatures on Graphite / Epoxy Composite Materials // Journal of Engineering Materials and Technology. 1989. V. 111. P. 438–439.

14. Сокова С.Д. Выбор электроизоляционных материалов для ремонта с учетом из совместимости и особенностей эксплуатации // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 151–156.

15. THE ROLE OF BOUND WATER AND CAPILLARY WATER IN THE EVALUATION OF POROSITY IN RESERVOIR ROCKS Nadia Pallat & David Thornley BP Research Centre, Sunbury-on-Thames, TW16 7LN.

16. Matthew Caurie, Bound water: its definition, estimation and characteristics, International Journal of Food Science and Technology, Volume 46, Issue 5, May 2011, Pages 930–934.

17. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в усло-

виях экстремально холодного климата // Известия Алтайского государственного университета. 2020. № 1(111). С. 41–51.

18. Startsev O.V., Krotov A.S., Startseva L.T. Interlayer Shear Strength of Polymer Composite Materials During Long Term Climatic Ageing // Polym. Degrad and Stab. 1999. V. 63. P. 183–186.

19. Kablov E. & Startsev V. (2021). The Influence of Internal Stresses on the Aging of Polymer Composite Materials: a Review. Mechanics of Composite Materials. 57. 565–576.

20. O.V. Startsev, M.P. Lebedev, and A.K. Kychkin. Aging of polymer composite materials in an extremely cold climate, Izv. Altai. State Univ., No. 1 (111), 41–51. (2020).

21. S.A. Grammatikos, R.G. Jones, M. Evernden, and J.R. Correia. Thermal cycling effects on the durability of a pultruded GFRP material for off-shore civil engineering structures, Compos. Struct., 153, 297–310. (2016).

22. F. Awaja, S. Zhang, M. Tripathi, A. Nikiforov, and N. Pugno. Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, Progress in Mater. Sci., 83, 536–573. (2016).

23. Bazli, Ashraf, Jafari, Zhao, Raman, and Bai. Effect of fibers configuration and thickness on tensile behavior of GFRP laminates exposed to harsh environment. Polymers, 11, No. 9, (2019).

Информация об авторах

А. Л. Терешкин – младший научный сотрудник лаборатории «Комплексные климатические испытания» Якутского научного центра.

А. А. Габышев – младший научный сотрудник лаборатории «Комплексные климатические испытания» Якутского научного центра.

А. А. Гаврильева – научный сотрудник отдела «Материаловедение» Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова.

И. Г. Лукачевская – кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Комплексные климатические испытания» Якутского научного центра.

Information about the authors

A.L. Tereshkin - Junior Research Associate of the Laboratory 'Integrated Climate Tests' of the Yakutsk Scientific Centre.

A.A. Gabyshev - Junior Research Associate of the Laboratory 'Complex Climate Testing', Yakutsk Scientific Centre.

A.A. Gavrilieva - Research Associate of the Materials Science Department of the V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North.

I.G. Lukachevskaya - Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory 'Complex Climatic Tests', Yakut Scientific Centre.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mart 2026.