

Исследование биологического воздействия на базальтопластиковую арматуру

Л.А. Ерофеевская^{*1}, А.К. Кычкин², А.А. Кычкин³, М.П. Лебедев^{2,3}

¹Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

²Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

³ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Якутск, Россия

*lora-07.65@mail.ru

Аннотация. В лабораторно-полевых опытах впервые установлена возможность проникновения мицелия плесневых грибов в структуру базальтопластиковых стержней. При биологическом загрязнении на границе волокно–связующее обнаруживаются участки вспучивания и проникновения в связующий компонент палочковидных спорных клеток бактерий. После экспозиции опытных образцов в условиях экстремально низких температур с поверхности стержней также выделены штаммы плесневых грибов рода *Aspergillus* и спорообразующие бактерии рода *Bacillus*, иммобилизованные на опытные образцы 1 год назад. Это свидетельствует о высокой жизнеспособности иммобилизованных штаммов в условиях холодного климата. Аборигенную микрофлору, выделенную методом накопительных культур из опытных образцов, представили: актинобактерии родов *Nocardia* и *Streptomyces*; дрожжи рода *Rhodotorula*; плесневые грибы рода *Penicillium*. Показано, что метод накопительных культур является высокоинформативным приемом диагностики биозаражения полимерных композиционных материалов при их эксплуатации в экстремально низких температурах. Метаболическая активность клеток криофильных микроорганизмов, выделенных из опытных образцов базальтопластиковых стержней связана с особенностями ферментов и жирнокислотного состава липидного бислоя клеточных мембран, которые в условиях, оптимальных для жизнедеятельности микроорганизмов, находятся в жидко-кристаллическом состоянии, а при попадании в температурные условия, когда у обычных (мезофильных) микроорганизмов прекращается развитие вегетативных клеток, включается процесс перехода липидного бислоя клеточных мембран в гелеобразное состояние, что позволяет при снижении температуры окружающей среды до отрицательных значений предотвратить кристаллизацию и гибель микробной клетки. И, как следствие, после оттаивания возобновляется рост и восстанавливается метаболическая активность микроорганизмов. Проведены исследования влияния биозаражения на прочностные характеристики. При этом после экспонирования в течение 1 года коэффициент сохранения прочностных свойств составил $k = 0,82$. Полученные результаты свидетельствуют о том, что селективированные штаммы влияют на свойства полимерных материалов в условиях холодного климата по отношению к органическим компонентам в структуре полимерных композитов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, базальтопластиковая арматура, микроорганизмы, культуры, криофильность, биодеструкторы.

Благодарности. Исследования проведены по проекту «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (тема FWRS-2021-0023, ЕГИСУ НИОКТР №AAAA-A21-121012190038-0).

Введение

Ущерб от коррозии и старения возрастает из-за биологического поражения материалов в самых разнообразных условиях эксплуатации (атмосфера, гидросфера, литосфера, космическое пространство). Во многих случаях доминирующей причиной разрушений является биокоррозия.

Актуальны исследования видового состава микроорганизмов-биодеструкторов, поражающих материалы в различных климатических зонах: выделение новых штаммов и пополнение коллекций тест-культур активными микроорганизмами. В настоящее время изучение биологического воздействия на полимерные композиционные

материалы (ПКМ) является одним из актуальных направлений не только в области микробиологической науки, но и ряда других научно-прикладных дисциплин, занимающихся изучением свойств материалов и технологий их получения [1–4].

При испытаниях в лабораторных и природных условиях расширяется поиск новых экологически чистых биоцидных добавок и способов защиты металлических, неметаллических материалов и нефтепродуктов от воздействия биовредителей [5–8].

Все больше появляется сведений о микробной контаминации и влиянии этого процесса на разрушение ПКМ. Поражаемость микроорганизмами наиболее значительна в географических зонах с относительно высокой температурой воздуха, повышенной влажностью, обилием органической пыли (тропики и субтропики) [9–12].

Действие микроорганизмов на полимерные образцы вызывает их биодegradацию в разной степени, это обусловлено как составом полимерных материалов, так и различной активностью разных видов микроорганизмов с высокоактивными внеклеточными гидролазами, фосфатазами и другими ферментами, прежде всего это грибы из родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Cladosporium*, *Fusarium* и бактерии родов *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Bacillus*, *Arthrobacter*; разрушающие полимерные соединения в окислительных условиях [13, 14]. И это лишь незначительная часть изученных биодеструкторов, поскольку в лабораторных условиях, клетки, которые могут расти в культуре, составляют менее 1 % от общего мерзлотного сообщества микробов. Для большинства жизнеспособных клеток режимы культивирования до сих пор не найдены, и их изучают с применением культурально-независимых методов [15]. Тем не менее, в настоящее время в области биодegradации проводится большое количество исследований, и, учитывая огромный метаболический потенциал микроорганизмов, ожидается, что разработка рентабельных и жизнеспособных процессов биодegradации – это вопрос времени [16].

Остается малоизученным вопрос о роли контаминации материалов криофильными микроорганизмами и изменении свойств ПКМ под влиянием биологического воздействия при их эксплуатации в природно-климатических условиях Крайнего Севера [17].

Практически не исследована тема биозаражения перспективной базальнопластиковой армату-

ры (БПА), в том числе и в северных регионах. Нет информации об участии микроорганизмов-биодеструкторов в процессах биоповреждения БПА.

Способность криофильной группы микроорганизмов адсорбироваться из внешней среды на материалы зависит во многом от адгезивных свойств микробных клеток. Адгезивные свойства характерны для многих криофильных, психрофильных и психротелерантных бактериальных ассоциаций и мицелийобразующей микрофлоры, способных к росту при температурах 4–5 °С. При благоприятных условиях (температура, влажность, pH и др.) процессы адгезии сменяются процессом проникновения микроорганизмов в микротрещины, где они накапливают свою биомассу, в результате чего происходит расширение и разветвление трещин за счет возникновения внутренних напряжений и, как следствие, ухудшение эксплуатационных свойств ПКМ [18, 19]. Однако способность к адгезии бактерий и грибов при температурах ниже –40 °С практически не изучена.

Целью настоящей работы заключалась в выделении и изучении микроорганизмов, контаминирующих полимерные композиты при отрицательных температурах окружающей среды и влияние этого процесса на разрушение материалов промышленного назначения.

Материалы и методы исследования

Материалом для исследований служили опытные образцы базальнопластиковых стержней различного диаметра (БПА). На рис. 1 представлен профиль (а) и общий вид образцов БПА (б). Экспонирование биозараженных БПА проводилось согласно ГОСТ 9.708-83 в экстремально холодном климате г. Якутск на климатической станции ИФТПС им. В.П. Ларионова СО РАН, в течение 1 года (рис. 1, в, г).

Методы исследования на биологическое заражение. Исследование биологического загрязнения базальнопластиковых стержней проводили в три этапа.

На первом этапе для выделения микроорганизмов использовали методы смыва, накопительных культур в минеральной среде и нативного наложения испытуемых образцов на твердые агаризированные питательные среды.

Для осуществления метода смыва предварительно готовили забуференную пептонную воду следующего состава (г/л): протеозопептон – 10,00; натрия хлорид – 5,00; натрия гидрофос-

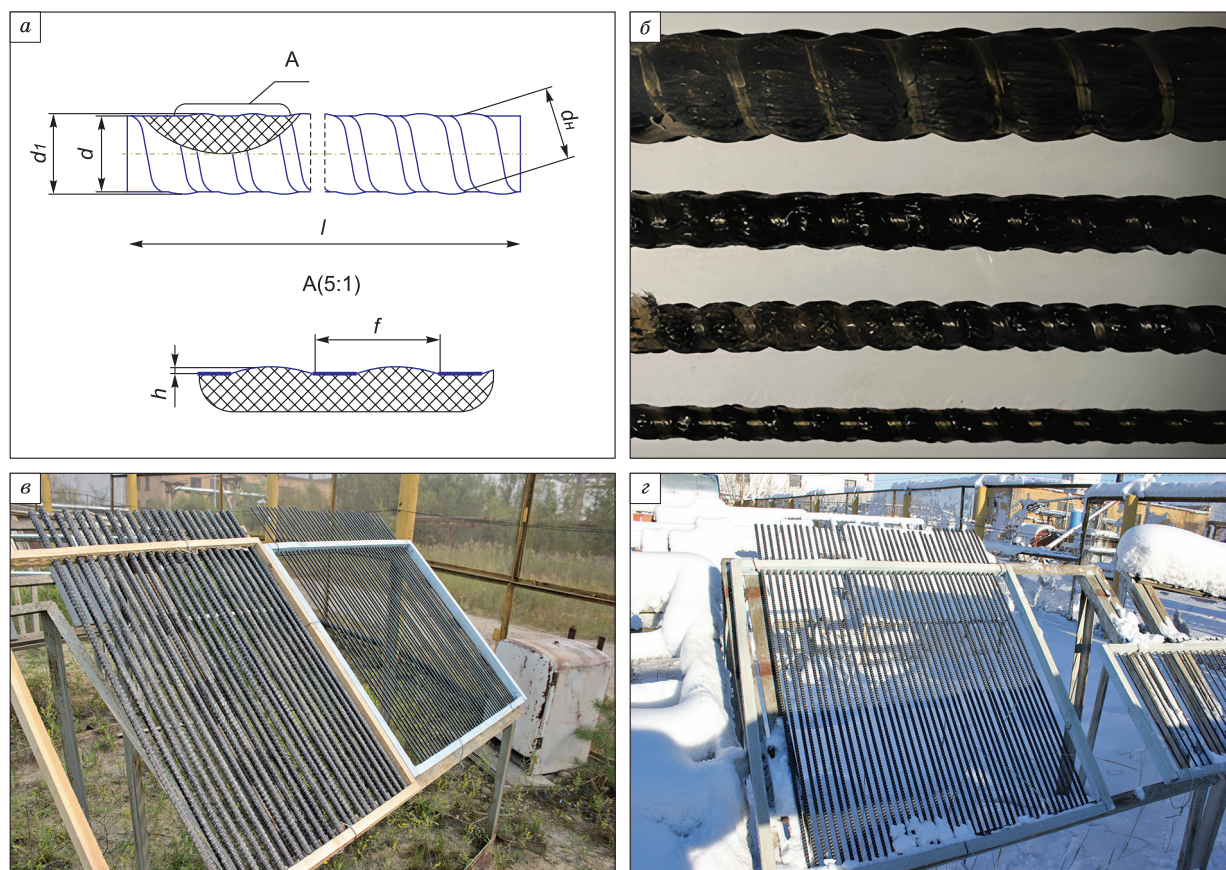


Рис.1. Профиль БПА (а) и общий вид БПА (б). Экспонированные образцы БПА различных диаметров, в – летний период, г – зимний период (полигон климатических испытаний)

Fig. 1. The keys of periodic rebar profile (a), samples of BFRP rebar (б). Exposure of BFRP rebar in Yakutsk: в – in summer and г – winter.

фат – 3,50; калия дигидрофосфат – 1,50. Забуференная пептонная вода использовалась в качестве средства для повышения эффективности диагностики биозаражения БПА криофильными микроорганизмами.

Ингредиенты, входящие в вышеописанный состав, размешивали в 1 л дистиллированной воды, после чего устанавливали pH до $7,2 \pm 0,2$ условных единиц и разливали в стерильные стеклянные флаконы по 50 мл.

Флаконы с забуференной пептонной водой стерилизовали при 1,1 атмосферы (121°C) в течение 15 минут.

После стерилизации флаконы с забуференной пептонной водой охлаждали при комнатной температуре.

Затем подготавливали необходимое количество предварительно простерилизованных биологических пробирок с ватными тампонами для забора смывов с образцов БПА № 1–4, экспонируемых на полигоне климатических испытаний.

В подготовленные пробирки с ватными тампонами асептически разливали по 2 мл охлажденной стерильной забуференной пептонной воды. После чего ватными тампонами производили смывы с опытных образцов БПА и тут же доставляли в лабораторию на микроскопическое исследование для предварительной экспресс-диагностики на биозаражение. Для этого смывную жидкость, полученную с опытных образцов БПА, окрашивали люминесцентным красителем L-7012 LIVE/DEAD BacLight Bacterial Viability Kit, производства Molecular Probes (США) и подготавливали микроскопический препарат. Полученную окрашенную смывную жидкость наносили на предметные стекла, распределяя тонким слоем в центре стекла на площади 2×1 см и просматривали в флуоресцентном микроскопе (объектив $\times 100$, окуляр $\times 10$, масляная иммерсия).

Для получения накопительных культур микроорганизмов оставшуюся в пробирках смывную жидкость, отобранную с исследуемых (of BFRP

rebar) образцов БПА № 1–4 вышеописанным способом, инкубировали в течение 24 ч при комнатной температуре, после чего пересеивали на мясопептонный агар (МПА) и агаризованные среды Сабуро и Чапека промышленного производства (ФБУН ГНЦ ПМБ Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии, г. Оболенск, Россия).

Культивирование посевов на подготовленных питательных средах проводили в стационарных условиях в холодильнике при температуре 4 ± 1 °С.

Для диагностики биозаражения нативным методом в стерильные чашки Петри или емкости медицинские лотки необходимого размера наливали агаризованные питательные среды, толщиной слоя около 6 мм. После того как питательные среды застывали, их просушили в сухо-воздушном термостате ТС-80 (Касимовский приборный завод, Россия) при 37 °С в течение 40 минут. Просушивание питательной среды проводили по методике «Об унификации микробиологических (бактериологических) методов исследований, применяемых в клинично-диагностических лабораториях лечебно-профилактических учреждений». После этого на поверхности застывшей питательной среды раскладывали подготовленные опытные образцы в виде стержней длиной 20 см, предварительно подготовленных из образца № 4. Лотки закрывали крышками, размещали в холодильнике и инкубировали при температуре 4 ± 1 °С в течение от 14 до 30 суток для учета роста криофильных микроорганизмов и для учета мезофильных микроорганизмов при температурах 25, 30 и 37 ± 1 °С в течение 5, 3 и 1 суток соответственно.

Для выделения чистых культур и изучения их культурально-биохимических свойств полученные колонии пересеивали в чашки Петри на поверхность МПА с последующим посевом на скошенный в биологических пробирках агар и постановкой биохимических тестов.

Для определения родства микроорганизмов и построения филогенетических деревьев проводили обработку секвенсов при помощи компьютерной программы, находящейся на сайте RDP-II (Ribosomal Database Project II, Michigan state university), и общепринятых для генетической идентификации методик.

На втором этапе, с целью изучения процесса биоповреждения базальтопластиковых стержней микроорганизмами, опытные образцы складско-

го хранения № 4 длиной 20 см размещали в почву на глубину 20 см. Экспозиция опыта составила 1 год.

Через год опытные образцы изымали из почвы и провели микробиологические исследования смывного материала и соскобов, отобранных с базальтопластиковых стержней. Выделение микроорганизмов проводили вышеописанными способами, с последующей идентификацией.

Из доминантных культур сформировали рабочую коллекцию, перспективную для биотехнологического применения и изучения селективированных микроорганизмов в качестве деструкторов ПКМ.

На третьем этапе из рабочей коллекции микробных культур были получены биопрепараты, которыми обработали стержни БПА складского хранения диаметрами 6 и 8 мм. Далее биозараженные образцы стержней длиной 1000 мм были размещены на полигоне климатических испытаний г. Якутск в течение 2 лет.

После экспонирования биозараженные образцы были исследованы на изменения прочностных характеристик.

Исследование структуры материалов. Исследование структуры образцов проводили при помощи:

1) флюоресцентного светодиодного микроскопа «МИКМЕД-6», производство: АО «ЛОМО» (Россия, Санкт-Петербург) увеличение $\times 100$; спектральная область исследуемой люминесценции 520 нм;

2) лабораторного поляризованного микроскопа Axiolab Pol, производство фирма «Карл Цейсс» (Германия) с увеличением $\times 1000$;

3) электронного микроскопа G1200 12MP 1-1200X (ККМОН, Китай) с непрерывным усилением $\times 10$.

Испытания на растяжение. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Z600 Zwick/Roell (Zwick, Германия) согласно ГОСТ 32492-2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик»,

Испытания на растяжение проводили при комнатной температуре 20 °С, при относительной влажности 40 %. Расчетная длина образца при проведении испытаний составляла 200 мм. Скорость предварительной нагрузки составляла 10 мм/мин. Скорость испытания – 5 мм/мин.

Таблица 1

Пейзаж жизнеспособных микроорганизмов, выделенных из опытных образцов

Table 1

Viable microorganisms isolated from test samples

Наименование образца Sample name	Выделенные микроорганизмы Isolated microorganisms	
	Метод смыва	Нативный метод
Базальтопластиковая арматура, образец № 1 Basalt plastic rebar, sample No. 1	<i>Aspergillus</i>	<i>Bacillus</i>
	<i>Nocardia</i>	<i>Aspergillus</i>
Базальтопластиковая арматура, образец № 2 Basalt plastic rebar, sample No. 2	<i>Fusarium</i>	<i>Bacillus</i>
	<i>Nocardia</i>	<i>Fusarium</i>
	<i>Bacillus</i>	<i>Streptomyces</i> <i>Nocardia</i>
Базальтопластиковая арматура, образец № 3 Basalt plastic rebar, sample No. 3	<i>Aspergillus</i>	<i>Bacillus</i>
	<i>Nocardia</i>	<i>Aspergillus</i>
Базальтопластиковая арматура, образец № 4 Basalt plastic rebar, sample No. 4	<i>Nocardia</i>	<i>Bacillus</i>
	<i>Bacillus</i>	<i>Aspergillus</i> <i>Pseudomonas</i>

Результаты и обсуждения

На первом этапе работ из смывного материала, отобранного из фрагментов базальтопластиковой арматуры (БПА), экспонируемой в условиях открытого полигона климатических испытаний при экстремально низких температурах (0...–42 °C) было выделено по крайней мере три группы криофильных микроорганизмов: бактерии рода *Bacillus*, актинобактерии рода *Nocardia* и микроскопические плесневые грибы родов *Aspergillus* и *Fusarium* (табл. 1).

Установлено, что доля жизнеспособных клеток в смывной жидкости составила 33 %. Выделенные микроорганизмы распределены в следующем соотношении: бактерии – 23 % и плесневые грибы – 33 %, актинобактерии – 44 %.

Одновременно изучен метод нативного наложения опытных образцов на агаризированные питательные среды (рис. 2, 3).

В пейзаже микроорганизмов, обрастающих поверхность фрагментов БПА, доминировали спорообразующие бактериальные культуры преимущественно из рода *Bacillus* (*B. subtilis*; *B. cereus*). В незначительной численности выделены плесневые микроскопические грибы рода *Aspergillus* (*A. niger*, *A. fumigatus*); актинобактерии родов *Streptomyces* (*S. albus*), *Nocardia* sp. и неферментирующие грамотрицательные бактерии рода *Pseudomonas* (*Ps. aurigenosa*). Свойства выделенных микробных культур представлены в табл. 2.

Микроскопическим методом установлено, что размер клеток бациллярных штаммов составляет 0,7–3,0 мкм; псевдомонад – 0,6 × 1,5 мкм; стрептомицетов – 1–2 мкм (диаметр гиф) и 0,5–2,0 мкм (диаметр спор); нокардий 0,5–2,0 мкм (диаметр гиф); фузариумов – 2,5–5,0 мкм (диаметр гиф воздушного мицелия), 8–12 мкм (хламидоспоры), 30 × 5 мкм (макроконидии); аспер-

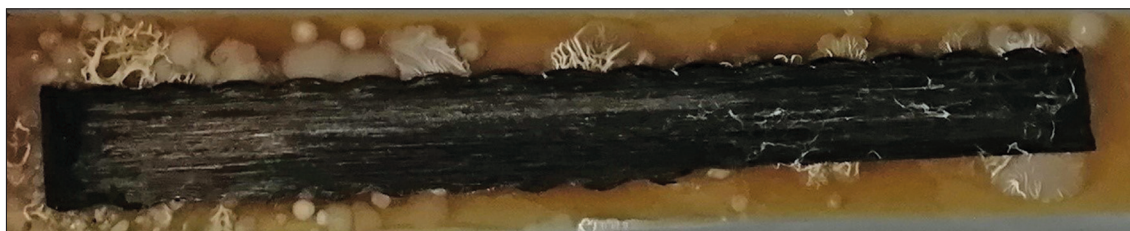
Рис. 2. Обрастание опытных образцов БПА колониями *B. subtilis* и *B. cereus*.Fig. 2. Fouling of basalt plastic rebar's prototypes by *B. subtilis* and *B. cereus* colonies.



Рис. 3. Обрастание опытных образцов БПА колониями *Bacillus subtilis* и *S. albus*.

Fig. 3. Fouling of basalt plastic rebar's experimental samples by *Bacillus subtilis* and *S. albus* colonies.

гилл – 4–6 мкм (ширина мицелия), 7–10 мкм (гифы), 2–3,5 мкм (споры).

После изучения взаимоотношений между выделенными культурами были отселектированы

штаммы, работающие по принципу нейтрального действия друг на друга.

На основе выделенных культур плесневых грибов, обладающих нейтральным действием

Таблица 2

Изученные свойства выделенных микроорганизмов
(+ положительный тест, – отрицательный тест, (+) слабоположительный тест)

Table 2

Studied properties of isolated microorganisms
(+ positive test, – negative test, (+) weakly positive test)

Свойство (тест) Property (test)	Выделенные культуры Dedicated crops					
	<i>Fuzarium</i> sp.	<i>B. cereus</i>	<i>Ps. aurugenosa</i>	<i>A. niger</i>	<i>Nocardia</i> sp.	<i>S. albus</i>
Окраска по Граму Gram stain	+	+	–	+	+	+
Подвижность Mobility	–	+	+	–	–	–
Глюкоза Glucose	+	+	+	+	+	+
Лактоза Lactose	+	–	–	+	+	–
Сорбит Sorbitol	+	–	–	+	+	+
Инозит Inositol	–	+	–	–	+	–
Мальтоза Maltose	–	–	–	+	+	–
Маннит Mannit	+	+	+	+	+	–
Сахароза Sucrose	+	+	–	+	+	+
Каталаза Catalase	–	+	–	–	+	–
Оксидаза Oxidase	–	+	+	–	–	–
Лецитиназа Lecithinase	–	+	–	+	+	–
Малонат натрия Sodium malonate	+	+	–	+	+	+

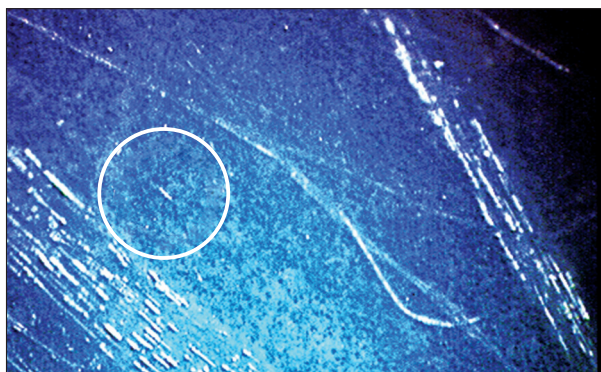


Рис. 4. Мицелий грибов рода *Aspergillus* на границе волокно-связующее (отвердитель) – мицелий грибов – волокно и клетки бактерий рода *Bacillus*, опытный образец 3K2-2-3ПО.

Fig. 4. Mycelium of fungi of the genus *Aspergillus* at the border «fiber-binder (hardener) – fungal mycelium – fiber» and cells of bacteria of the genus *Bacillus*, prototype 3K2-2-3PO.

друг на друга, изготовлены жидкие биопрепараты, которыми обрабатывали стержни опытных образцов БПА с целью изучения их биоповреждающих свойств после однолетнего срока экспозиции в условиях экстремально холодного климата. Изучены изменения, произошедшие в структуре исследуемых образцов под влиянием плесневых грибов *A. niger* и *A. fumigatus*.

Перед постановкой опыта стержни БПА длиной 1 м предварительно вымачивали в ванне, заполненной жидким биопрепаратом на основе спор *A. niger* + *A. fumigatus* (в соотношении 1:1, с концентрацией $1 \cdot 10^9$ клеток на 1 см^3) в течение пяти суток (время, необходимое для прорастания спор). После заражения спорами стержни БПА высушивали контактным способом. Экспонирование биозараженных стержней БПА проводили на территории полигона климатических испытаний в Якутске в течение 12 месяцев.

Через год после экспозиции в опытных образцах стержней БПА методом микроскопирования обнаружен мицелий плесневых грибов рода *Aspergillus*, что свидетельствует о их выживаемости в условиях холодного климата.

Рост мицелия зафиксирован, как по направлению вдоль длины между базальтовых волокон на границах волокно-связующее (отвердитель) – мицелий грибов – волокно, так и поперек волокон. Также при микроскопическом методе исследования на образцах стержней БПА зафиксированы палочкообразные клетки бактерий. Некоторые из них имели на одном из концов



Рис. 5. Мицелий грибов рода *Aspergillus*, прорастаемый из стенки БПА и клетки бактерий рода *Bacillus*, биозараженный образец БПА 3K-14 после климатического испытания.

Fig. 5. Mycelium of fungi of the genus *Aspergillus*, germinating from the wall of the BPA and the cells of bacteria of the genus *Bacillus*, biologically infected sample of the basaltplastic rebar 3K-14 after climatic test.

споры, что свидетельствует о сохранении микроорганизмов в толще стержней БПА после экспозиции в условиях экстремально низких температур ($0 \dots -42^\circ \text{C}$) (рис. 4, 5).

Длина грибного мицелия, который пророс в опытных образцах за 1 год, при микроскопическом исследовании зафиксирована на уровне от 1,4 до 1,8 мкм (мкм), что при пересчете на 1 г исследуемого образца БПА составляет около 0,035–0,045 см, или 0,00035–0,00045 м. Пересчет производили по методу Джонсона и Моллиса [20].

С целью изучения процесса биоповреждения стержней БПА микроорганизмами опытные образцы разместили в почву на глубину 20 см в течение 1 года.

При визуальном контроле начало деструкционного процесса при воздействии на опытные образцы выглядело в виде затемнения, вызванного деградацией органических компонентов связующих базальтового волокна. При микроскопи-

ческом исследовании на границе волокно–связующее просматривались участки вспучивания связующего и палочкообразные споровые клетки почвенных бактерий в виде коротких цепочек (по 1–2 клетки), которые, вероятно, попали в образцы из объектов окружающей среды, в частности, из почвы.

При высеве смывов, отобранных с разрезов опытных образцов, были выделены спорообразующие бактерии рода *Bacillus* (*B. subtilis* и *B. cereus*).

Микроскопическим методом также зафиксированы затемнения на поврежденных участках стержней БПА, контактировавших с почвой, и вспучивание связующего внутри образцов (рис. 6).

Таким образом, установлено, что мицелий грибов может использовать для своего развития микротрещины, появившиеся в результате механического разрушения материала под влиянием климатических условий или механического повреждения в результате хранения или эксплуатации строительных материалов. За разрушающее воздействие ПКМ отвечают органические компоненты, входящие в состав материалов, которые в процессе метаболизма могут быть использованы микроорганизмами в качестве источника энергии и питания.

Таксономическую принадлежность выделенных микроорганизмов устанавливали на основании нуклеотидной последовательности 16S рРНК гена.

Полученный штамм *Bacillus simplex* характеризуется следующими признаками: грамположительные палочковидные клетки с центрально-расположенными эллипсоидными спорами.

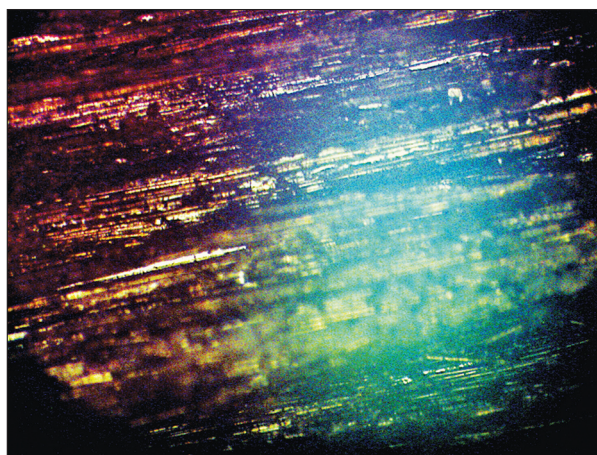


Рис. 6. Вспучивание связующего в поврежденном участке опытного образца стержня БПА (БВ-1П.2-19), контактировавшего с почвой.

Fig. 6. Swelling of the binder in the damaged area of the basaltplastic rebar (BV-1P.2-19) in contact with the soil.

Результаты обработки секвенсов при помощи компьютерной программы, находящейся на сайте RDP-II (Ribosomal Database Project II) [21], предназначенной для определения родства микроорганизмов и построения филогенетических деревьев, представлены в виде табл. 3.

Анализ филогенетического родства, построенный с использованием типовых штаммов близкородственных бактерий, с учетом морфобиологических свойств штамма, показывает, что наиболее близким к исследуемому штамму является вид *Bacillus simplex* (100 %).

Полученный штамм *Bacillus* sp. характеризуется следующими признаками: грамположительные палочковидные клетки с центрально-расположенными овальными спорами.

Таблица 3

Филогенетическая идентификация близкородственных бактерий к исследуемому штамму

Table 3

Phylogenetic identification of closely related bacteria to the studied strain

Наименование Name	Штамм Strain	Регистрационный номер Accession	Парное сходство (%) Pairwise Similarity (%)	Разница/Длина фрагмента (нуклеотид) нт Diff/Total nt
<i>Bacillus simplex</i>	NBRC 15720(T)	AB363738	100,00	0/911
<i>Brevibacterium frigoritolerans</i>	DSM 8801(T)	AM747813	99,89	1/911
<i>Bacillus muralis</i>	LMG 20238(T)	AJ628748	99,67	3/911
<i>Bacillus butanolivorans</i>	K9(T)	EF206294	99,34	6/911
<i>Bacillus psychrosaccharolyticus</i>	ATCC 23296(T)	X60635	97,50	22/879

Филогенетическая идентификация близкородственных бактерий к исследуемому штамму

Table 4

Phylogenetic identification of closely related bacteria to the studied strain

Название Name	Штамм Strain	Регистрационный номер Accession	Парное сходство (%) Pairwise Similarity (%)	Разница/Длина фрагмента (нуклеотид) нт Diff/Total nt
<i>Bacillus aerophilus</i> *	28K(T)	AJ831844	99,89	1/922
<i>Bacillus altitudinis</i> *	41KF2b(T)	AJ831842	99,89	1/922
<i>Bacillus stratosphericus</i> *	41KF2a(T)	AJ831841	99,89	1/922
<i>Bacillus safensis</i>	FO-036b(T)	AF234854	99,46	5/919
<i>Bacillus pumilus</i>	ATCC 7061(T)	ABRX01000007	99,35	6/922
<i>Bacillus idriensis</i>	SMC 4352-2(T)	AY904033	97,18	26/922

Первичный скрининг по базе данных GenBank и RDP-II [21, 22] показал, что исследуемый штамм принадлежит к следующим систематическим группам: *Bacteria*, *Firmicutes*, *Bacilli*, *Bacillales*, *Bacillaceae*, *Bacillus*.

Результаты обработки секвенсов при помощи компьютерной программы находящейся на сайте RDP-II (Ribosomal Database Project II) [21], предназначенной для определения родства микроорганизмов и построения филогенетических деревьев, представлены в виде табл. 4.

Анализ филогенетического родства, построенный с использованием типовых штаммов близкородственных бактерий, с учетом морфофизиологических свойств штамма, показывает, что наиболее близким к исследуемому штамму являются три вида (см. табл. 4), по этому критерию исследуемый бактериальный штамм отнесен к виду *Bacillus* sp.

Полученный штамм *Bacillus vallismortis* характеризуется следующими признаками: грам-положительные палочковидные спорообразующие клетки.

Установлено, что исследованный штамм *Bacillus vallismortis* обладает супрессивными качествами по отношению к патогенным плесневым грибам рода *Aspergillus* (исследованы *A. niger*, *A. fumigatus*), выделенным из стержней БПА.

Бактерицидная способность штамма *Bacillus vallismortis* по отношению к изученным плесневым грибам связана с продуцированием биологически активных веществ (БАВ) в процессе метаболизма.

Штамм *Bacillus vallismortis* рассматривается как один из перспективных биологических аген-

тов для создания биопрепарата для защиты ПКМ от биоповреждений.

Полученный штамм *Aspergillus niger* характеризуется следующими культурально-морфологическими признаками: на МПА, среде Сабуро и среде Чапека–Докса формирует грибницу, имеющую хорошо развитый воздушный мицелий черного цвета, который крепко закреплен на питательной среде.

Штамм *Aspergillus niger* рассматривается как потенциальный агент биозаражения и биодеструкции ПКМ и в дальнейшем может быть использован в качестве тест-организма для испытания ПКМ на грибостойкость.

Для исследования регулирования деятельности микробов были изучены 24 штамма биологических деструкторов компонентов ПКМ, нефти и НП, органических соединений растительного происхождения и растительных жиров на межмикробные взаимодействия. Для дальнейших испытаний отобраны *Bacillus simplex*, *Bacillus* sp., *Bacillus cereus*, *Bacillus vallismortis*, у которых при целенаправленном исследовании выявлены новые свойства, в частности, антагонистическая активность по отношению к плесневым грибам.

Скрининг микроорганизмов вели по принципу отбора микробных культур, обладающих фунгицидной активностью в отношении штаммов *A. niger*, *A. niger* и *A. fumigatus*, выделенных из фрагментов БПА, экспонируемых на открытом полигоне климатических испытаний.

Для исследования антагонистической активности отобранных штаммов использовали общепризнанный в микробиологии метод перпендикулярных штрихов, основанный на высеве бакте-

Таблица 5

**Антагонистическая активность культур (антагонист / тест-культура;
+ тест положительный; – тест отрицательный)**

Table 5

Antagonistic activity of cultures (antagonist / test culture; + test positive; – test negative)

Метод исследования Research method	<i>Bacillus</i> sp. / <i>A. niger</i>	<i>Bacillus</i> sp. / <i>A. fumidatus</i>	<i>Bacillus</i> sp. / <i>B. simplex</i>	<i>B. simplex</i> / <i>A. niger</i>	<i>B. simplex</i> / <i>A. fumidatus</i>	<i>A. niger</i> / <i>A. fumidatus</i>
Метод перпендикулярных штрихов Perpendicular stroke method	+	+	–	+	+	–

Таблица 6

**Фунгицидная активность селекционированных штаммов
(+ тест положительный; – тест отрицательный; (+) тест слабоположительный)**

Table 6

**Fungicidal activity of the selected strains
(+ test is positive; – test is negative; (+) test is weakly positive)**

Название Name	Культуры опытной иммобилизации Experimental immobilization cultures		Культуры, выделенные из фрагментов опытного образца Cultures isolated from fragments of a prototype	
	<i>Bacillus</i> sp.	<i>B. simplex</i>	<i>A. fumigatus</i>	<i>A. niger</i>
<i>A. niger</i>	+	+	–	–
<i>A. fumigatus</i>	+	+	–	–

риологической петлей исследуемой культуры бактериального штамма штрихом на поверхность застывшего в чашке Петри мясопептонно-агара.

О наличии у культуры исследуемого бактериального штамма антагонистической активности судили по наличию зоны ингибирования тест-штамма.

По величине диаметра зоны ингибирования тест-штамма судили о степени антагонистической активности исследуемой культуры бактериального штамма.

Результаты испытаний отобранных штаммов на антагонистическую активность представлены в табл. 5.

Установлено, что при испытании взаимоотношений между штаммами-антагонистами и чувствительными к ним тестовыми культурами плесневых грибов антагонистическая активность проявляется выше при использовании парного состава культур (*Bacillus* sp.+*B. simplex* и *A. niger* +*A. fumidatus*), чем при использовании этих же микроорганизмов в составе монокультур.

Одновременно исследовали фунгицидную активность к селекционированным плесневым грибам (табл. 6).

На основе криофильных и психротрофных плесневых грибов, выделенных вышеописанными методами из стержней БПА, были получены жидкие биопрепараты. С целью изучения зависимости их биодеструкции от степени заражения полученными биопрепаратами были обработаны стержни БПА диаметрами 6 и 8 мм, складского хранения. При этом степень зараженности составила $\times 10^9$ степени для грибов и бактерий, по стандарту мутности по методу Тарасевича.

Экспонирование биозараженных БПА проводили на климатической станции ИФТПС им. В.П. Ларионова СО РАН, в течение 1 года.

Результаты сравнительных испытаний на осевое растяжение приведены в табл. 7.

При сравнении значений предела прочности для исходных образцов и биозараженных образцов, экспонированных на открытой площадке Якутска в течение 12 месяцев, видно уменьшение предела прочности на 19 % для образцов диаметром 6 мм и на 21 % соответственно для образцов диаметром 8 мм.

Заключение

1. В результате выполненных микробиологических исследований из компонентов для изго-

Результаты сравнительных испытаний образцов БПА на осевое растяжение

Table 7

Results of BPA samples comparative tests for axial tension

Серия БПА BPA series	Е, ГПа	σ_B , МПа	Е, ГПа	σ_B , МПа	Е, ГПа	σ_B , МПа
	Исходные данные Initial data		Данные после 12 месяцев экспонирования Data after 12 months of exposure		Данные биозараженных после 12 месяцев экспонирования Bioinfected data after 12 months of exposure	
Серия 1 (диаметр 6 мм Series 1 (diameter 6 mm))	53,2	1120,1	52,7	1205,85	49,7	909,88
Серия 2 (диаметр 8 мм) Series 2 (diameter 8 mm)	50,8	1003,4	51,2	1023,77	44,7	791,99

товления полимерных композитов (отвердитель и базальтовое волокно) методом накопительных культур выделены актинобактерии рода *Streptomyces*, спорообразующие бактерии рода *Bacillus*, плесневые грибы рода *Aspergillus* и *Penicillium*, что свидетельствует о возможном заражении образцов при их хранении. Можно предполагать, что использование в строительных конструкциях загрязненного микроорганизмами материала будет снижать сроки их эксплуатации. Процессы биодеструкции в готовых изделиях могут протекать при взаимодействии органических компонентов и микроорганизмов, загрязняющих эти компоненты, на границах волокно–связующее–микроорганизмы–связующее–волокно.

2. В микроскопических препаратах, полученных из смывной жидкости, отобранной с поверхности образцов базальтопластиковых композиционных материалов, экспонируемых на полигоне климатических испытаний в условиях открытой экосистемы при экстремально низких температурах окружающей среды (до -42°C), доля жизнеспособных клеток составила 33 %, из которых бактерии заняли 23 %; плесневые грибы – 33 % и мицелий образующие актинобактерии – 44 %. Это свидетельствует о том, что микроорганизмы, способные к образованию мицелия, менее чувствительны к низким температурам, чем бактерии.

3. В опытных образцах полимерных композитов, обработанных микробными спорами, через один год экспозиции на полигоне климатических испытаний обнаружены клетки бактерий и мицелий плесневых грибов, что свидетельствует о выживаемости иммобилизованных микроорганизмов в условиях холодного климата. В лабораторно-полевых опытах впервые установлена возможность проникновения грибного мицелия

в структуру базальтопластиковых стержней при их эксплуатации и экспозиции в условиях открытого полигона.

4. Расширен спектр микроорганизмов, способных загрязнять полимерные композиционные материалы при экстремально-низких температурах (до -42°C). Положено начало формированию рабочей коллекции-биодеструкторов полимерных композитов. Достоверность таксономической принадлежности большинства микробных штаммов, включенных в рабочую коллекцию, подтверждена современным молекулярно-генетическим методом, построенным на основании нуклеотидной последовательности 16S рРНК гена, а также при детальном изучении строения микробных клеток микроскопическим методом при помощи растрового электронного микроскопа марки JEOLJSM-7800F.

5. При исследовании влияния различных факторов окружающей среды на морфотинктуриальные и культурально-биохимические свойства микроорганизмов, включенных в рабочую коллекцию, установлен общий признак для исследуемых микробных штаммов, в частности – свойство психротрофности, что перспективно для биотехнологического применения полученных микроорганизмов в условиях холодного климата. Большинство штаммов рабочей коллекции обладают осмотолерантностью и могут развиваться в условиях ограниченного доступа кислорода, что дает основание для их применения в субстратах с повышенным содержанием солей и замедленным воздухообменом.

6. При исследовании характера межмикробных взаимодействий микроорганизмов-биодеструкторов установлено, что антагонистическая активность бактерий, включенных в рабочую

коллекцию, проявляется выше при использовании парного состава культур: *Bacillus* sp.+ *Bacillus simplex* в отношении патогенных плесневых грибов рода *Aspergillus* (*A. niger*, *A. fumigatus*).

7. В результате сравнительных испытаний установлено влияние на прочностные свойства базальтопластиковой арматуры криофильных и психротрофных плесневых грибов при экспонировании холодного климата: наблюдалось уменьшение предела прочности на 19–21 %.

Литература

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
2. Каблов Е.Н., Ерофеев В.Т., Светлов Д.А., Смирнов В.Ф., Богатов А.Д. Биоповреждения в космических аппаратах // Сб. Междунар. науч.-технич. конф. «Композиционные материалы. Теория и практика». Тула, 2015. С. 40–46.
3. Kleeberg I., Hetz C., Kroppenstedt R.M. et al. Biodegradation of aliphatic/aromatic copolyesters by thermophilic actinomycetes // Applied Environmental Microbiology. 1998. Vol. 64. P. 1731–1735.
4. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Полякова А.В. Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов // Авиационные материалы и технологии. 2001. Т.1. С. 81–86.
5. Полякова А.В., Кириллов В.Н. Микробиологическая стойкость неметаллических материалов // Авиационные материалы и технологии. 2001. Т.1. С. 86–88.
6. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Морозов Е.А. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2001. 196 с.
7. Брюханов А.Л. Исследование микробного разнообразия в биообрастаниях, поражающих различные материалы // Сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
8. Берлин А.А. Биоразлагаемые полимерные материалы // Сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 2015 (conf.viam.ru).
9. Hadad D., Geresh S., Sivan A. Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis* // Journal Application Microbiology. 2005. Vol. 98. P. 1093–1100.
10. Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Морозов Е.А. Микробиологическое разрушение материалов. М.: Высшая школа, 2008. 124 с.
11. Webb H.K., Arnott J., Crawford R.J., Ivanova E.P. Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly(ethylene terephthalate) // Polymers. 2013. Vol. 5. P. 1–18. DOI: 10.3390/polym5010001.
12. Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Лазарев А.В., Богатов А.Д., Казначеев С.В., Родин А.И., Смирнова О.Н., Смирнов И.В. Биологическая и климатическая стойкость полимерных композитов // Academia. Архитектура и строительство. 2017. С. 112–119.
13. Сакаева Э.Х., Мехоношина А.В. Исследование биодеструкции отходов полимерных материалов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 1. С. 97–102.
14. Сакаева Э.Х., Куликова Ю.В., Рудакова Л.В. Биодеструкция полимерных композиционных материалов микроскопическими грибами // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 4. С. 68–75.
15. Крыленков В.А. Микробиота земной криосферы / В.А. Крыленков, А.Е. Гончаров. СПб.: Фолиант, 2019. 448 с.
16. Лантеев А.Б., Голубев А.В., Киреев Д.М., Николаев Е.В. К вопросу биодеструкции полимерных материалов в природных средах (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). С. 100–107. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-100-107.
17. Фахрутдинов А.И., Ямпольская Т.Д. Психрофильные микроорганизмы – элемент мониторинга субарктических и арктических экосистем // Сборник научных трудов по материалам I Всероссийской научно-практической конференции «Безопасный Север – чистая Арктика», Сургутский государственный университет. Сургут: ООО «Печатный мир», 2018. С. 107–110.
18. Кычкин А.К., Ерофеевская Л.А., Кычкин А.А. Микробиологическая диагностика биозаражений текстолитов, экспонируемых в природно-климатических условиях Якутии // Инновации и инвестиции. 2020. № 9. С. 144–148.
19. Erofeevskaya L.A., Aleksandrov A.R., Kychkin A.K. Prospects for the Use of Spore-forming Bacteria to Combat the Destruction of Polymeric Composite Materials // International science and technology conference “Far-EastCon-2019” IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2020. No. 753. 052010 IOP Publishing – 2020. doi:10.1088/1757-899X/753/5/052010). 20
20. Плесневые грибы. Методы выделения, идентификации, хранения. Справочное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям и специальностям экологического, биологического и биотехнологического профиля / Сост.: С.В. Еремеева. Астрахань: АГТУ, 2009. 104 с.
21. The Ribosomal Database Project (RDP) provides ribosome related data services to the scientific commu-

nity, including online data analysis, rRNA derived phylogenetic trees, and aligned and annotated rRNA sequences. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rdp.cme.msu.edu/>

22. *GenBank* – База данных, находящаяся в открытом доступе, содержащая все аннотированные последовательности ДНК и РНК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

Поступила в редакцию 07.10.2021

Принята к публикации 27.01.2022

Об авторах

ЕРОФЕЕВСКАЯ Лариса Анатольевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, ул. Петровского, 1, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-6864-7984>, Author ID: 57211213842, Researcher ID: H-2086-2017, e-mail: lora-07.65@mail.ru;

КЫЧКИН Анатолий Константинович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия, Author ID: 35300061400, Researcher ID: D-9234-2014, e-mail: kychkinplasma@mail.ru;

КЫЧКИН Айсен Анатольевич, научный сотрудник, ФИЦ «Якутский научный центр Сибирское отделение Российской академии наук», 677000, Якутск, ул. Петровского, 2, Россия, Author ID: 57215690274, Researcher ID: ABA-4932-2020, e-mail: icen.kychkin@mail.ru;

ЛЕБЕДЕВ Михаил Петрович, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Сибирское отделение Российской академии наук, ул. Октябрьская, 1, 677980 Якутск, Россия; генеральный директор, ФИЦ «Якутский научный центр Сибирское отделение Российской академии наук», 677000, Якутск, ул. Петровского, 2, Россия, Author ID: 57200772820, Researcher ID: P-8129-2015, e-mail: m.p.lebedev@mail.ru

Информация для цитирования

Ерофеевская Л.А., Кычкин А.К., Кычкин А.А., Лебедев М.П. Исследование биологического воздействия на базальтопластиковую арматуру // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 1. С. 152–166. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-152-166>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-1-152-166

Research of biological effects on basaltoplastic rebars

L.A. Erofeevskaya^{*1}, A.K. Kychkin², A.A. Kychkin³, M.P. Lebedev^{2,3}

¹Institute of Oil and Gas Problems SB RAS Yakutsk, Russia

²V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS Yakutsk, Russia

³Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre» SB RAS Yakutsk, Russia

*lora-07.65@mail.ru

Abstract. The study has, for the first time, confirmed the possibility of penetration of the mold fungi mycelium and spore-forming bacteria into the structure of the basalt fiber reinforced plastic rebars has been detected in the laboratory and field experiments. Biological contamination at the «fiber-binding» border revealed areas of swelling and penetration of the mold fungi mycelium and bacterial spore cells into the binder component. After the exposure of samples at extremely low temperatures, strains of mold fungi of the genus *Aspergillus* and spore-forming bacteria of the genus *Bacillus* immobilized for samples a year ago

were isolated from the surface of the rebars. This indicated the high viability of immobilized strains in the cold climates. Aboriginal microflora isolated from the samples by the enrichment culture technique was represented by the following: actinobacteria of the genera *Nocardia* and *Streptomyces*; yeast of the genus *Rhodotorula*; and mold fungi of the genus *Penicillium*. The enrichment culture technique proved to be a highly informative method of diagnosing the bio-infection of polymer composite materials during their operation in extremely low temperatures. The metabolic activity of the cryophilic microorganisms' cells isolated from the experimental samples of the basalt fiber reinforced plastic rebars was associated with the features of the enzymes and fatty acid composition of the lipid bilayer of cell membranes. They were in a liquid-crystalline state in the optimal conditions for cryophilic microorganisms. In the case of temperature conditions when conventional (mesophilic) microorganisms stopped developing the vegetative cells, the transition process of the lipid bilayer of the cell membranes into a gel-like state was activated. The transition of the lipid bilayer to a gel-like state allowed the prevention of crystallization and death of the microbial cell when the ambient temperature dropped to the negative values. As a result, after thawing, growth resumed and the metabolic activity of the microorganisms was restored. We have also studied the effect of biodepletion on the elastic strength characteristics. After a year of exposure, the strength preservation coefficient was $k = 0,82$. The results showed that the selected strains affect the properties of polymeric materials in the cold climates in relation to the organic components in the structure of polymer composites.

Keywords: polymer composite materials, basaltplastic rebar, microorganisms, cultures, cryophilicity, biodestructors.

Acknowledgements. The research was carried out within the State Assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme number FWRS-2021-0041).

References

1. Kablov E.N., Starcev O.V. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya korrozii i starenija materialov v klimaticheskikh usloviyakh (obzor) // Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. No. 4 (37). P. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
2. Kablov E.N., Erofeev V.T., Svetlov D.A., Smirnov V.F., Bogatov A.D. Biopovrezhdeniya v kosmicheskikh apparatah // Sb. Mezhdunar. nauch.-tehnich. konf. «Kompozicionnye materialy. Teoriya i praktika». Tula, 2015. P. 40–46.
3. Kleeberg I., Hetz C., Kroppenstedt R.M. et al. Biodegradation of aliphatic/aromatic copolyesters by thermophilic actinomycetes // Applied Environmental Microbiology. 1998. Vol. 64. P. 1731–1735.
4. Kirillov V.N., Efimov V.A., Poljakova A.V. Klimaticheskaja i mikrobiologicheskaja stojkost' nemetallicheskih materialov // Aviacionnye materialy i tehnologii. 2001. Vol. 1. P. 81–86.
5. Poljakova A.V., Kirillov V.N. Mikrobiologicheskaja stojkost' nemetallicheskih materialov Aviacionnye materialy i tehnologii. 2001. Vol. 1. P.86–88.
6. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Semicheva A.S., Morozov E.A. Biologicheskoe soprotivlenie materialov. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta, 2001. 196 p.
7. Brjuhanov A.L. Issledovanie mikrobnogo raznoobrazija v bioobrastanijah, porazhajushhih razlichnye materialy // Sb. trudov II Vserossijskoj nauch.-tehnich. konf. «Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya korrozii i starenija materialov v klimaticheskikh usloviyakh: problemy i perspektivy». Gelendzhik, 2015 (conf.viam.ru).
8. Berlin A.A. Biorazlagaemye polimernye materialy // Sb. trudov II Vserossijskoj nauch.-tehnich. konf. «Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya korrozii i starenija materialov v klimaticheskikh usloviyakh: problemy i perspektivy». Gelendzhik. 2015 (conf.viam.ru).
9. Hadad D., Geresh S., Sivan A. Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis* // Journal Application Microbiology. 2005. Vol. 98. P. 1093–1100.
10. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Morozov E.A. Mikrobiologicheskoe razrushenie materialov. M.: Vysshaja shkola, 2008. 124 p.
11. Webb H.K., Arnott J., Crawford R.J., Ivanova E.P. Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly(ethylene terephthalate) // Polymers. 2013. Vol. 5. P. 1–18. DOI: 10.3390/polym5010001.
12. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Lazarev A.V., Bogatov A.D., Kaznacheev S.V., Rodin A.I., Smirnova O.N., Smirnov I.V. Biologicheskaja i klimaticheskaja stojkost' polimernih kompozitov // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. 2017. P. 112–119.
13. Sakaeva J.H., Mehonoshina A.V. Issledovanie biodestrukcii othodov polimernih materialov // Transport. Transportnye sooruzhenija. Jekologija. 2017. No. 1. P. 97–102.
14. Sakaeva J.H., Kulikova J.V., Rudakova L.V. Biodestrukcija polimernih kompozicionnyh materialov mikroskopicheskimi gribami // Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija, 2018. No. 4. P. 68–75.
15. Krylenkov V.A. Mikrobiota zemnoj kriosfery / V.A. Krylenkov, A.E. Goncharov. SPb.: Foliant, 2019. 448 p.

16. *Laptev A.B., Golubev A.V., Kireev D.M., Nikolaev E.V.* K voprosu biodestrukcii polimernyh materialov v prirodnyh sredah (obzor) // Trudy VIAM, 2019. No. 9 (81). P. 100–107. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-100-107.
17. *Fahrutdinov A.I., Jampol'skaja T.D.* psihrofil'nye mikroorganizmy – jelement monitoringa subarkticheskikh i arkticheskikh jekosistem // Sbornik nauchnyh trudov po materialam I Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Bezopasnyj Sever – chistaja Arktika», Surgutskij gosudarstvennyj universitet. Surgut: OOO «Pechatnyj mir», 2018. P. 107–110.
18. *Kychkin A.K., Erofeevskaja L.A., Kychkin A.A.* Mikrobiologicheskaja diagnostika biozarazhenij tekstil'nyh, jeksponiruemym v prirodno-klimaticheskikh uslovijah Jakutii // Innovacii i investicii. 2020. No. 9. P. 144–148.
19. *Erofeevskaja L.A., Aleksandrov A.R., Kychkin A.K.* Prospects for the Use of Spore-forming Bacteria to Combat the Destruction of Polymeric Composite Materials // International science and technology conference “Far-EastCon-2019” IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2020. No. 753. 052010 IOP Publishing – 2020. doi:10.1088/1757-899X/753/5/052010). 20.
20. *Plesnevyje griby. Metody vydelenija, identifikacii, hranenija. Spravochnoe posobie dlja studentov vysshih uchebnyh zavedenij, obuchajushhihsja po napravlenijam i special'nostjam jekologicheskogo, biologicheskogo i biotehnologicheskogo profilja.* / Sost.: S.V. Eremeeva. Astrahan': AGTU, 2009. 104 p.
21. *The Ribosomal Database Project (RDP) provides ribosome related data services to the scientific community, including online data analysis, rRNA derived phylogenetic trees, and aligned and annotated rRNA sequences.* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rdp.cme.msu.edu/>
22. *The GenBank sequence database is an open access, annotated collection of all publicly available nucleotide sequences and their protein translations.* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

Submitted 07.10.2021

Accepted 27.01.2022

About the authors

ЕРОФЕЕВСКАЯ, Larisa Anatolyevna, Cand. Sci. (Biology), senior researcher, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-6864-7984>, Author ID: 57211213842, Researcher ID: H-2086-2017, e-mail: lora-07.65@mail.ru;

КЫЧКИН, Anatoly Konstantinovich, Cand. Sci. (Engineering), leading researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>, Author ID: 35300061400, Researcher ID: D-9234-2014, e-mail: kychkinplasma@mail.ru;

КЫЧКИН, Aisen Anatolyevich, researcher, Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre», Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1540-8140>, Author ID: 57215690274, Researcher ID: ABA-4932-2020, e-mail: icen.kychkin@mail.ru;

ЛЕБЕДЕВ, Mikhail Petrovich, corresponding member of RAS, Dr. Sci. (Engineering), chief researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia; Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre», Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677000, Russia, Author ID: 57200772820, Researcher ID: P-8129-2015, e-mail: m.p.lebedev@mail.ru

Citation

Erofeevskaja L.A., Kychkin A.K., Kychkin A.A., Lebedev M.P. Research of biological effects on basaltoplastic rebars // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 1. P. 152–166. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-152-166>