

УДК 57.045+57.047:67.017  
DOI: 10.7868/S25000640210310

## ВЛИЯНИЕ АБИОТИЧЕСКИХ И БИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОБРАЗЦЫ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 В ЗОНЕ СМЕШЕНИЯ МОРСКИХ И РЕЧНЫХ ВОД

© 2021 г. Академик Г.Г. Матишов<sup>1,2</sup>, Н.И. Булышева<sup>1</sup>, А.В. Клещенко<sup>1</sup>,  
Г.Ю. Глущенко<sup>1</sup>, К.В. Кренёва<sup>1</sup>, К.С. Григоренко<sup>1</sup>, А.В. Назаренко<sup>1</sup>,  
Е.А. Варченко<sup>3</sup>, А.А. Гончаров<sup>3</sup>, А.В. Гладких<sup>3</sup>

**Аннотация.** С целью оценки коррозионной стойкости образцов алюминиевого сплава марки Д16 на двух станциях в устьевой области Дона проведены натурные стендовые испытания в период с декабря 2018 г. по декабрь 2019 г. Описан гидролого-гидрохимический режим акватории. Флуктуации ионного состава на участках проведения эксперимента зависели от объема речного стока, частоты и амплитуды сгонно-нагонных явлений и связанных с ними интрузий осолоненных вод при нагонах или падений уровня воды при сгонах. Условия среды воздействуют на экспериментальные пластины как непосредственно, так и опосредованно, через влияние на состав и структуру формирующегося сообщества обрастания.

Сукцессионный ход микрофитоперифитона на образцах Д16 в разных участках дельты р. Дон характеризовался двухпиковой кривой с максимумом на девятом месяце экспозиции. В структуре фитоперифитона на протяжении исследования преобладали диатомовые водоросли. Микрозооперифитон на экспериментальных пластинах представлен преимущественно инфузориями. С увеличением срока экспозиции была отмечена тенденция к увеличению доли колониальных и крупных сидячих видов инфузорий. Формирование сообществ макрообрастания начиналось на образцах, находящихся в воде более трех месяцев. Фонообразующими видами на пластинах, экспонировавшихся при полном погружении в течение 6 месяцев, являются мшанки *Fredericella sultana*, а через 9 и 12 месяцев – моллюски *Dreissena polymorpha*.

При испытаниях в воде образцов в течение 12 месяцев выявлено, что наибольшая площадь коррозионных поражений для сплава Д16 получена на станции 2 – 50 %, в то время как при испытаниях на станции 1 площадь коррозионных поражений не превышает 30 % от общей площади поверхности. По результатам определения состава продуктов коррозии на всех пластинах преобладают продукты окисления поверхности образцов, элементы, входящие в состав водной среды, а также элементы органического происхождения.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав Д16, коррозия, устьевая область Дона, зона смешения вод, гидроклиматические условия, сообщества обрастаний.

### INFLUENCE OF ABIOTIC AND BIOTIC FACTORS ON SAMPLES OF D16 ALUMINUM ALLOY IN THE MIXING AREA OF SEA AND RIVER WATERS

Academician RAS G.G. Matishov<sup>1,2</sup>, N.I. Bulysheva<sup>1</sup>, A.V. Kleshchenkov<sup>1</sup>,  
G.Yu. Glushchenko<sup>1</sup>, K.V. Kreneva<sup>1</sup>, K.S. Grigorenko<sup>1</sup>, A.V. Nazarenko<sup>1</sup>,  
E.A. Varchenko<sup>3</sup>, A.A. Goncharov<sup>3</sup>, A.V. Gladkih<sup>3</sup>

**Abstract.** In order to assess the corrosion resistance of samples of aluminum alloy grade D16, full-scale bench tests were carried out at two stations in the Don River mouth area. Test period: December 2018 –

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: bulysheva@ssc-ras.ru

<sup>2</sup> Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

<sup>3</sup> Геленджикский центр климатических испытаний им. Г.В. Акимова Всероссийского института авиационных материалов (G.V. Akimov Gelendzhik Climate Test Center of All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Gelendzhik, Russian Federation), Российская Федерация, 353466, Краснодарский край, г. Геленджик, ул. Почтовая, 20

December 2019. During the research, the hydrological and hydrochemical regimes of the water area were described. Fluctuations of the ionic composition in the areas of the experiment depended on the volume of river runoff, the frequency and amplitude of surges and the associated intrusions of saline waters during surges or a drop in the water level during surges. It is shown that environmental conditions affect the experimental plates both directly and indirectly through the influence on the composition and structure of the forming fouling community.

The dynamics of microphytoperiphyton on samples D16 in different parts of the delta was characterized by a two-peak curve with a maximum at the ninth month after the beginning of the experiment. Diatoms predominated, which is typical of many water bodies. Microzooperiphyton on the experimental plates is represented mainly by ciliates. With an increase in the exposure period, there was a tendency to an increase in the proportion of colonial and large sessile ciliates. The formation of macro-fouling communities began on samples that have been in the water for more than three months. The dominating species on the plates exposed at full immersion for 6 months were bryozoans *Fredericella sultana*. After 9 and 12 months the mollusks *Dreissena polymorpha* were dominant.

When testing samples in water for 12 months, it was revealed that the largest area of corrosion damage for alloy D16 was obtained at Station 2 – 50 %, while during tests at Station 1 the area of corrosion damage does not exceed 30 % of the surface. According to the results of determining the composition of corrosion products on all plates, oxidation products of the samples surface, elements that make up the aqueous medium, and also elements of organic origin prevail.

**Keywords:** D16 aluminum alloy, corrosion, Don River estuary, water mixing zone, hydroclimatic conditions, fouling communities.

## ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы благодаря ряду преимуществ (небольшой вес по сравнению со стальными конструкциями, стойкость к механическим ударам и т.д.) имеют широкий спектр применения в различных отраслях промышленности. В этой группе дюралюминий марки Д16 стоит особняком. По твердости и механической прочности он не уступает стали, но в отличие от нее обладает более легким удельным весом. Тем не менее этот сплав имеет один существенный недостаток – низкую коррозионную стойкость и нуждается в специальных антикоррозионных средствах защиты. Д16 широко используется в авиастроении, космической отрасли, нефтедобывающей промышленности и машиностроении. В последнее время изделия из сплавов такого типа в качестве конструктивных элементов начали широко применяться на промышленных объектах в различных климатических условиях (включая прибрежные районы), поэтому был проведен ряд экспериментов по изучению их характеристик в коррозионной среде [1]. В качестве коррозионной среды согласно ГОСТ 9.021-74 [2] использовался раствор состава: 30 г/л хлористого натрия + 10 мл/л соляной кислоты, плотность раствора 1,19 г/мл, температура 25–30 °С. Авторами работы [1] было выявлено, что в образцах после испытания в коррозионной среде возникающие механические напряжения ниже, чем в образцах, испытанных на воздухе.

Д16 находит применение и в судостроении при изготовлении конструкций, не соприкасающихся с морской атмосферой и водой, а также для корпусов клепаных речных катеров и настилов полов. Однако конструктивным элементам не всегда удастся избежать контакта с коррозионной средой, к которой относятся морские и речные воды. Следует учитывать, что факторы внешней среды, такие как температура воздуха и воды, ионный состав, уровень минерализации, могут воздействовать на материалы как непосредственно, так и косвенно – они влияют на формирование сообществ обрастания на смачиваемых и погруженных поверхностях.

Главной особенностью воздействия морской среды на алюминиевые сплавы является ее повышенная агрессивность, ведущая к значительным коррозионным повреждениям [3]. При испытаниях на специальном научно-исследовательском судне, курсировавшем в тропических морях, было отмечено, что расслаивающая коррозия на образцах Д16Т, прикрепленных к днищу (полное погружение), вследствие сплошного обрастания образцов и формирования слоя минеральных отложений была меньше (0,7 мм), чем у экспонированных на палубе (1,4 мм) [4]. При погружении образцов на глубину свыше 100 м в Черном море, где обрастание отсутствовало, скорость расслаивающей коррозии резко возрастала (>4 мм). По данным экспериментов, проводившихся в прибрежной зоне Черного моря, для сплава Д16Т установлено увеличение глубины межкристаллитной коррозии с

0,5 мм (3 месяца экспозиции) до сквозной коррозии (через 12 месяцев экспозиции) в зоне сопряжения поверхностей, с 0,06 до 0,22 мм – в зоне, свободной от сопряжения. Поверхность образцов по истечении 12 месяцев эксперимента была покрыта водорослями рода *Cystoseira* [5].

Помимо испытаний образцов Д16 в морской воде были проведены опыты по оценке коррозионной стойкости этого сплава с использованием природных пресных вод. В ходе эксперимента было выявлено, что наименьшая скорость коррозии наблюдалась по истечении 3 суток эксперимента, затем она нарастала [6].

Сведения о стойкости Д16 в зоне смешения морских и речных вод отсутствуют, поэтому целью исследований была оценка коррозионной устойчивости этого сплава в условиях натурального эксперимента в устьевой области Дона.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

На полигонах Южного научного центра Российской академии наук (станция 1 – береговая научно-экспедиционная база (БНЭБ) «Кагальник» (протока Свиное гирло); станция 2 – гидрометеопост (ГМП) «Донской» (рукав Старый Дон)) в устьевой

области р. Дон 19.12.2018 г. на глубине 2 м были вертикально установлены стенды с экспериментальными пластинами площадью  $15 \times 15$  см, изготовленными из алюминиевого сплава марки Д16 (рис. 1). По истечении 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев экспозиции в воде часть образцов изымали, каждую пластину фотографировали с обеих сторон, помещали в отдельный контейнер с водой, в течение 10–15 минут доставляли в лабораторию на береговой базе для визуального осмотра и отбора пробы оброста.

Отбор и обработку организмов-обрастателей осуществляли в соответствии со стандартными гидробиологическими методиками [7]. При камеральной обработке живого материала сначала отбирали микрофито- и микрозооперифитон, затем макрозооперифитон.

Параметры воздушной и водной среды фиксировались в автоматическом режиме с дискретностью 10 минут. Соленость рассчитывали кондуктометрическим способом с использованием уравнения состояния морской воды УС-80 [8].

В течение периода наблюдений проводили отбор проб воды для определения ионного состава, рН, концентрации кислорода.

Исследование микроструктуры поверхности образцов, а также определение локального химиче-



**Рис. 1.** Карта-схема расположения экспериментальных станций и диаграммы ионного состава морских (1), речных (2) вод и вод зоны смешения (3).

**Fig. 1.** Schematic map of the location of experimental stations and diagrams of the ionic composition of sea waters (1), river waters (2) and waters of the mixing zone (3).

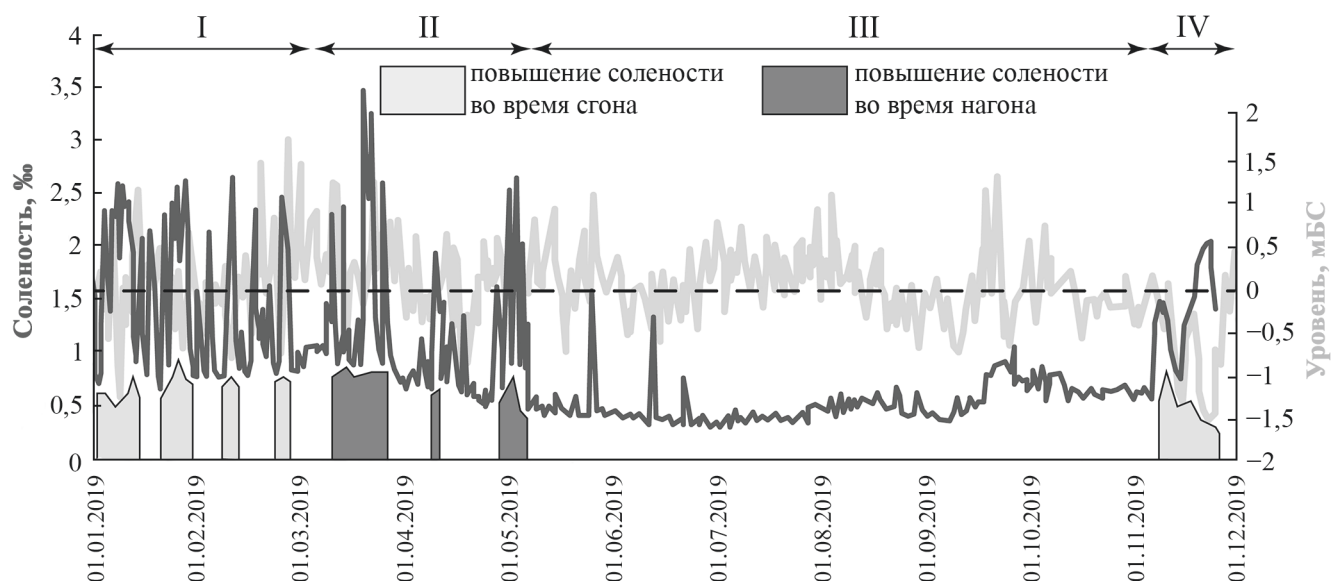


Рис. 2. Ход уровня воды и солености по данным гидрометпоста БНЭБ «Кагальник» в 2019 г.

Fig. 2. The course of the water level and salinity according to the data of the meteorological station of the Coastal Scientific Expedition Base "Kagal'nik" in 2019.

ского состава продуктов коррозии проводили в два этапа. На первом этапе исследования производили контроль качества экспериментальных пластинок на содержание в них сторонних компонентов. Результаты измерений показали, что используемые марки отвечают ГОСТам и не содержат посторонних примесей. На втором этапе провели элементный анализ экспериментальных пластинок на электронном сканирующем микроскопе Carl Zeiss EVO 40 с рентгеновской приставкой энергодисперсионного микроанализа INCA при увеличении  $\times 400$ . Ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток пучка – 1 нА. Калибровку величины силы тока проводили на эталонном образце кобальта. Время накопления спектров составляло 50 с.

Определение твердости проводили по ASTM E2546-15 [9] по методу Виккерса. Твердость определяли алмазной пирамидкой по Виккерсу при нагрузке 100 Н и скорости нагружения 0,5 мм/с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Термохалинная структура.** Температура воды на участках проведения эксперимента в придонном слое в период с 19.12.2018 по 19.03.2019 г. менялась от 0 до +5 °С. Устойчивый весенний рост температуры отмечен с 28.02.2019 г. В период 20–30.03.2019 г. значения температуры колебались в районе +6 °С, 30.03–13.04.2019 г. наблюдали устойчивый рост температуры до +11 °С, после

чего произошел ветровой сгон воды и температура понизилась до +5 °С. К началу июня вода прогрелась до +25 °С. Такая температура сохранялась до 27.06.2019 г.

Устьевая область Дона подвержена влиянию сгонно-нагонных явлений, при которых осолоненные воды Таганрогского залива могут подниматься на значительное расстояние вверх по течению реки. В настоящее время для данной территории характерно сложное сочетание пресных, слабосоленоватых и солоноватых вод: формируются шесть основных типов водных масс, часто наблюдается повышение солености (до 5 ‰), имеют место случаи инверсии стратификации вод, внедрения в солоноватые воды линз пресной воды [10].

В протоке Старый Дон отмечено свободное проникновение морских вод, тогда как южные рукава дельты Дона, в том числе Свиное гирло, во время ветровых сгонов практически полностью изолируются от речных вод Дона мелководными порогами и заполняются минерализованными водами р. Кагальник, которые имеют преимущественно сульфатно-кальциевый состав [11].

Увеличение солености на станции 2 связано только с нагонными явлениями. Для станции 1 в зимний период характерен повышенный фон солености (до 2,5 ‰), а максимальные значения фиксировались как при сгонах, так и при нагонах. Зарегистрированный максимум составил 3,4 ‰ 10.03.2019 г.

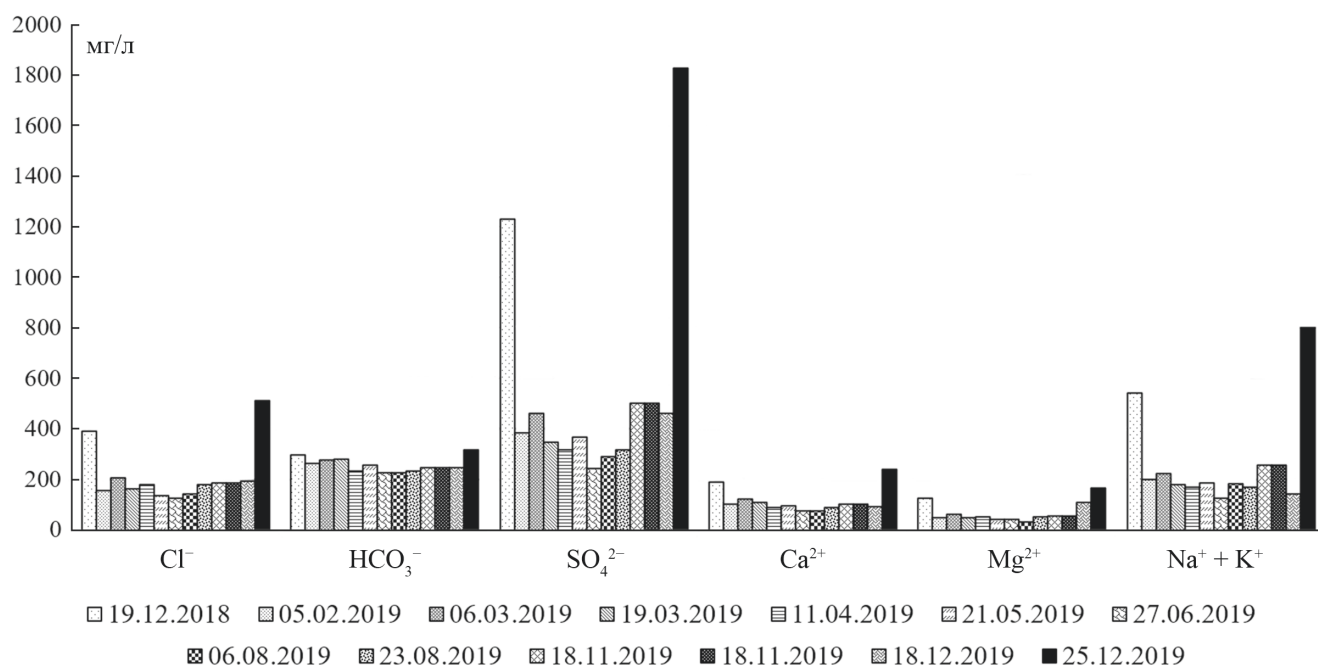


Рис. 3. Изменение ионного состава на участке экспозиции БНЭБ «Кагальник».

Fig. 3. Change in the ionic composition at the exposition area of the Coastal Scientific Expedition Base "Kagal'nik".

С 20.03 по 30.06.2019 г. зафиксировано четыре эпизода повышения минерализации. Три связаны со сгонными (18–20.05, 4–7.06, 13–16.06). Период 13–25.04 сопровождался переменным уровнем – от  $-0,5$  до  $+0,5$  мБС. Период I, 20–30.03 (рис. 2), охарактеризован частным заполнением Свиного гирла подземными водами, общим повышенным уровнем солености, сгонно-нагонными колебаниями уровня воды и стабильными показаниями температуры. В апреле (период II) начался весенний рост температуры при таком же нестабильном уровне воды и солености. Во время весенне-летнего сезона (период III) прекратились эпизоды заполнения водотоков минерализованными подземными водами, общий уровень солености понизился до фонового, сгонно-нагонный режим был нестабилен, температура возросла до  $20$  °С, после чего наступила летняя межень, температура достигла максимума, минерализация при нечастых и коротких сгонах держалась на минимальном уровне. Такой термохалинный режим сохранился в сентябре и октябре. Минимальный уровень воды наблюдался 20.11.2019 г., впоследствии протоки дельты Дона заполнились подземными минерализованными водами, что характерно для зимней межени (период IV) (рис. 2).

**Гидрохимические условия.** Флуктуации ионного состава в акватории проведения эксперимента зависели от объема речного стока, частоты и амплитуды сгонно-нагонных явлений и связанных с

ними интрузий осолоненных вод при нагонах или падений уровня воды при сгонах. Весной, летом и осенью 2019 г. воды на станции 1 относились к сульфатному классу кальциевой группы с преобладанием в ионном составе сульфатов. Однако в условиях сгона 25.12.2019 г. по результатам отбора проб воды у БНЭБ «Кагальник» были отнесены к сульфатному классу натриевой группы [12] (рис. 3). Значения pH изменялись от 8,1 до 8,5.

На станции 2 в период с 19.12.2018 по 25.12.2019 г. воды были отнесены к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Минерализация воды в обследуемой акватории во второй половине 2019 г. сохранялась в пределах  $1$  г/л (рис. 4). Значения pH в период исследований изменялись в диапазоне 8,1–8,7.

В ходе проведения эксперимента особое внимание было уделено изучению сезонного изменения концентрации растворенного в воде кислорода как одного из факторов, влияющих на коррозионную активность среды. Фотосинтез водных растений, динамика вод увеличивают содержание  $O_2$ , снижают его разложение органических остатков, «цветение» водоема [13]. Степень насыщения воды растворенным кислородом в сочетании с соленостью может влиять на изменение скорости коррозии. Так, коррозия в воде с пониженной соленостью, но насыщенной кислородом (в устьях рек), более интенсивная, чем в морской воде с высоким содержанием  $Cl^-$ , но низким содержанием  $O_2$  [13].

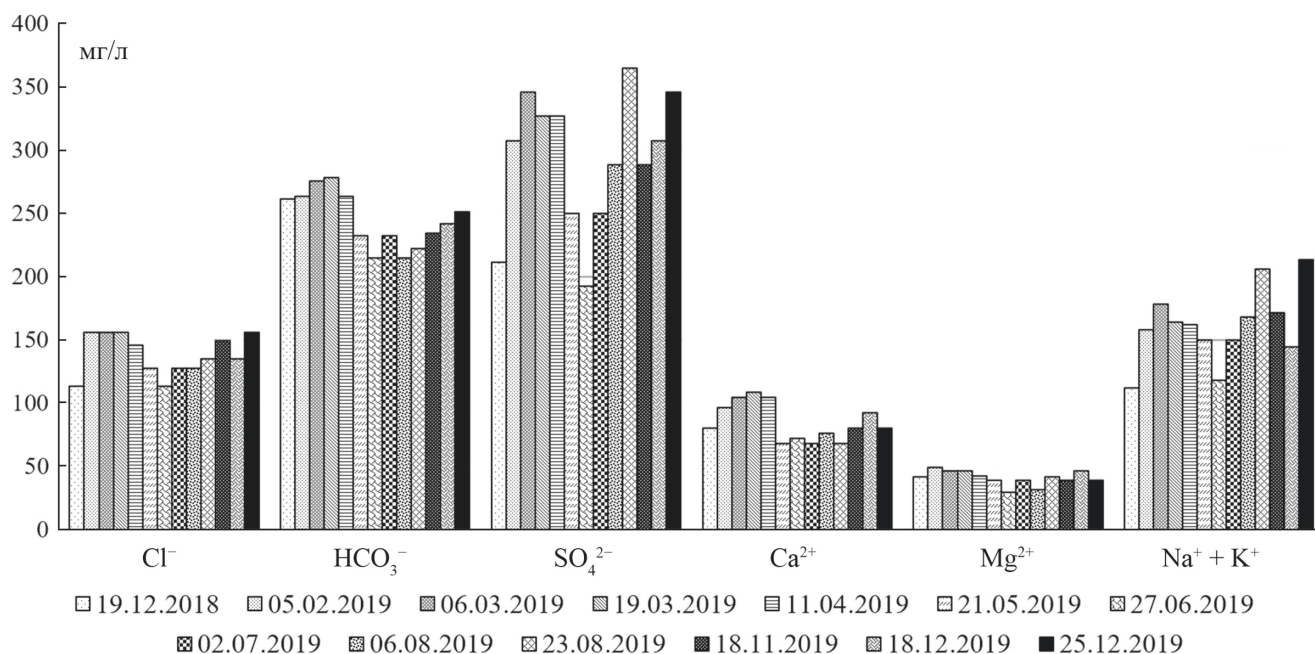


Рис. 4. Изменение ионного состава на участке экспозиции ГМП «Донской».

Fig. 4. Change in the ionic composition at the exposure area of the gauging station "Donskoy".

В пределах станции 1 в весенний период наблюдаются более благоприятные условия для развития фитопланктона – быстрое прогревание воды по сравнению со станцией 2, что приводит к продуцированию значительного количества кислорода, поступающего в водную толщу. Концентрации  $O_2$  в воде на БНЭБ «Кагальник» достигают значений 13–14 мг/л, насыщение – 103–105 %, в то время как на ГМП «Донской» – 10–11 мг/л и насыщение 85–87 %. Дополнительным фактором выступает ослабленная гидродинамика в Свином гирле (скорость течения редко превышает 0,5–0,8 м/с), в то время как на станции 2 за время экспозиции неоднократно фиксировались скорости более 1,2 м/с. В летний период, с ростом температуры воды, концентрации  $O_2$  снижаются на обеих станциях и достигают значений 5–9 мг/л (насыщение 66–96 %) на станции 1 и 5–10 мг/л (насыщение 60–119 %) на станции 2. На ГМП «Донской» кислородный режим подвержен меньшим колебаниям из-за лучшей гидродинамики и водообмена с прилегающими участками русла. В осенне-зимний период на станции 2 наблюдается более низкая температура воды; промывной режим русла способствует тому, что в данной акватории не накапливаются остатки отмерших водных растений и фитопланктона, поэтому концентрации кислорода здесь составляют 7,4–8,4 мг/л (насыщение 73–83 %). В то же время на станции 1 температура воды, как правило, на 2–3 °C выше, идет активное разложение

отмирающих органических остатков в условиях пониженного водообмена с прилегающими участками русла, и, как следствие, концентрации кислорода здесь ниже – 7,3–6,8 мг/л (насыщение 78–67 %).

Условия среды (гидролого-гидрохимический режим, сезон, глубина и др.) определяют состав и структуру сообществ обрастания в каждой конкретной акватории.

**Сообщества обрастания.** В составе **фитоперифитона** на образцах Д16 было обнаружено 146 таксонов микроводорослей рангом ниже рода, относящихся к семи отделам. Большинство обнаруженных видов принадлежало диатомовым водорослям (49 %), в меньшей степени зеленым (29 %) и цианобактериям (13 %), и совсем незначительная доля от общего разнообразия была у эвгленовых (5 %), харовых (2 %), динофитовых и криптофитовых водорослей (по 1%). В основном данные виды являются типичными эпифитам и представителями бентоса, но также в составе были отмечены и планктонные формы.

По истечении 1 месяца экспозиции наиболее часто встречаемыми были представители перифитонной и бентосной флоры отдела Bacillariophyta в обоих районах наблюдения (виды родов *Navicula* Bory, 1822, *Staurosirella* Williams & Round, 1988, *Cymbella* cf. *lanceolata* (C. Agardh) Kirchner). Биомасса и численность микрофитоперифитона на пластинах Д16 на станции 1 были 0,04 мкг/см<sup>2</sup> и

**Таблица 1.** Изменения количественных характеристик фито- и микрозооперифитона в течение 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев экспозиции  
**Table 1.** Changes in the quantitative characteristics of phytoperiphyton and microzooperiphyton during 1, 3, 6, 9 and 12 months of exposure

Срок экспозиции Exposure period	Биомасса (мкг/см <sup>2</sup> ) Biomass (µg/cm <sup>2</sup> )		Численность (кл./см <sup>2</sup> ) Density (cells/cm <sup>2</sup> )		Количество видов Number of species	
	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy
1 месяц экспозиции / 1 month of exposure						
Фитоперифитон Phytoperiphyton	0,04	0,19	26	85	17	21
Микрозооперифитон Microzooperiphyton	0,03	0,40	2	12	4	7
3 месяца экспозиции / 3 months of exposure						
Фитоперифитон Phytoperiphyton	0,22	1,18	116	387	22	18
Микрозооперифитон Microzooperiphyton	–	2,40	–	111	–	5
6 месяцев экспозиции / 6 months of exposure						
Фитоперифитон Phytoperiphyton	0,12	0,42	53	109	27	27
Микрозооперифитон Microzooperiphyton	3,90	1,20	105	13	17	6
9 месяцев экспозиции / 9 months of exposure						
Фитоперифитон Phytoperiphyton	0,32	1,42	235	234	54	33
Микрозооперифитон Microzooperiphyton	0,80	0,50	14	8	6	5
12 месяцев экспозиции / 12 months of exposure						
Фитоперифитон Phytoperiphyton	0,37	0,69	84	171	31	25
Микрозооперифитон Microzooperiphyton	1,70	8,40	52	706	14	8

26 кл./см<sup>2</sup>, число видов – 17; на станции 2 – 0,19 мкг/см<sup>2</sup> и 85 кл./см<sup>2</sup>, число видов – 21 (табл. 1).

Спустя 3 месяца на экспериментальных пластинах в перифитоне продолжали преобладать диатомовые водоросли. Доминантный комплекс был схожим в обоих районах экспозиции. Преобладающие виды: *Navicula* spp., *Nitzschia sigmoidea* (Nitzsch) Smith, *Cymbella* cf. *lanceolata*, *Cumatopleura solea* (Brébisson) Smith. Увеличились показатели биомассы и численности (табл. 1).

Спустя еще 3 месяца на пластинах Д16 было отмечено резкое снижение количественных показателей (табл. 1), при этом доминирование сохранялось за диатомовыми водорослями.

По истечении 6 месяцев экспозиции отмечено изменение видового состава фитоперифитона. Произошло относительное снижение обилия прикрепленных диатомовых водорослей, отмечены различия в доминирующих комплексах разных районов. Общее количество встреченных на пла-

стинах Д16 видов было равным в разных акваториях (по 27 видов), но доминантами были следующие диатомовые водоросли: на станции 1 преобладали *Cyclotella meneghiniana* Kützing, *Staurisirella* sp., виды рода *Cymbella* Agardh, 1830; на станции 2 – *Navicula lanceolata* Ehrenberg, *Gyrosigma* sp., *Surirella* cf. *brebissonii* Krammer & Lange-Bertalot, *Melosira varians* Agardh.

Через 9 месяцев от начала эксперимента отмечено увеличение количественных показателей и видового разнообразия микроводорослей (табл. 1). Комплексы доминирующих видов на станциях отличались, но при этом в каждом районе среди фитоперифитона были обнаружены в большом количестве и представители планктона. На станции 1 доминировали *Pinnularia* sp. и планктонные виды *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen из диатомовых водорослей и *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák из цианобактерий. На станции 2 ядро доминирующих видов было представлено

диатомовыми водорослями *Nitzschia sigmoidea*, *Gyrosigma* sp. и планктонными представителями *Melosira varians* Agardh из отдела Bacillariophyta и *Microcystis flosaquae* (Wittrock) Kirchner из отдела Cyanobacteria.

По истечении 12 месяцев экспозиции на пластинах Д16 в обоих районах исследования в целом отмечали уменьшение количественных показателей (табл. 1). Основу биомассы составили немногочисленные крупноклеточные диатомовые (*Cymbella* cf. *lanceolata* на станции 1 и виды рода *Gyrosigma* Hassall, 1845 и *Bacillaria paxillifera* (Müller) Marsson на станции 2). В обоих районах исследования развитие микрофитоперифитона имело выраженную сезонную динамику, которую можно представить в виде кривой с двумя пиками значений численности и биомассы в марте и сентябре – октябре. К шестому месяцу эксперимента, в июне, наблюдали снижение количественных показателей в 2–2,8 раза, которое, вероятно, было вызвано не только сезонной сукцессией, но и воздействием интенсивного пресса фитофагов, заселивших к этому времени образцы. К девятому месяцу экспозиции биомасса и численность вновь увеличились в 2,7–3,4 раза, имея более выраженный второй пик, в котором значительная доля принадлежит осевшим на пластины представителям летне-осенней планктонной флоры. В декабре из-за понижения температуры воды и, как следствие, начала отмирания большинства микроводорослей наблюдали снижение количественных показателей фитоперифитона. Сравнивая развитие микрообрастаний в двух районах исследования, следует отметить, что на станции 2 на протяжении всей экспозиции количественные показатели были выше, чем на станции 1, при этом доминантные комплексы этих акваторий были схожими только в течение первых трех месяцев. В формировании структуры фитоперифитона в течение всего периода исследования преобладали диатомовые водоросли, что является типичным для многих водоемов [14], и только в октябре им содоминировали цианобактерии, что было связано с сезонной сукцессией.

**Микрозооперифитон** на экспериментальных пластинах представлен преимущественно инфузориями. Всего за время исследования на образцах Д16 было обнаружено 43 вида и формы инфузорий, из них 30 видов на пластинах на станции 1 и 27 видов – на станции 2. Наибольшая частота встречаемости в течение всего времени экспозиции на пластинах на станции 1 наблюдалась для

таких видов, как *Vorticella campanula* Ehrenberg, 1831 и еще нескольких видов вортицелл, относящихся к группе «*Convallaria*», для *Epistilis* sp., для *Stentor roeseli* Ehrenberg, 1835 и мелкой гипотрихиды *Aspidiska* spp. На пластинах на станции 2 состав комплекса массовых видов немного отличался. Здесь наряду с уже упоминавшимися *Vorticella campanula* Ehrenberg, 1831 и *Stentor roeseli* Ehrenberg, 1835 наибольшая частота встречаемости и уровень развития были у таких видов, как *Carchesium polypinum* Linnaeus, 1758 и *Zoothamnium* sp. Несмотря на общий комплекс массовых видов, уровень включения фаун довольно низок: коэффициент Жаккара – 0,33, коэффициент Серенсена – 0,49.

С увеличением срока экспозиции наблюдалась тенденция к увеличению доли колониальных и крупных сидячих видов инфузорий на пластинах, что приводит к усложнению архитектоники поверхности, увеличивая ярусность и создавая дополнительные поверхности для прикрепления других видов организмов. На колониях было обнаружено значительное количество эпибионтных видов инфузорий – *Cothurnia annulata* Stokes, 1885, *Vorticella* spp., *Pyxicola* spp.

На пластинах, расположенных на станции 1, видовое разнообразие в течение всего времени экспозиции было выше, чем на пластинах на станции 2. Количество видов на пластинах на станции 1 варьировало от 4 до 17, в среднем – 10 видов, на станции 2 – от 5 до 8 видов, в среднем 6. Минимальные значения были отмечены на пластинах 1- и 3-месячной экспозиции, максимальные – на пластинах 6- и 12-месячной экспозиции (табл. 1).

Численность перифитонных инфузорий на образцах на станции 1 колебалась от 2 до 105 кл./см<sup>2</sup> (в среднем  $43,2 \pm 23,1$  кл./см<sup>2</sup>), на станции 2 – от 8 до 706 кл./см<sup>2</sup> (в среднем  $170 \pm 131,5$  кл./см<sup>2</sup>). Наименьшие значения численности были отмечены на пластинах экспозиции сроком 1 и 9 месяцев, наибольшие – на пластинах, экспонировавшихся в течение 6 и 12 месяцев (табл. 1).

Биомасса перифитонных инфузорий на пластинах, расположенных на станции 1, колебалась от 0,03 до 3,9 мкг/см<sup>2</sup> (в среднем  $1,5 \pm 0,82$  мкг/см<sup>2</sup>), на станции 2 – от 0,4 до 8,4 мкг/см<sup>2</sup> (в среднем  $2,3 \pm 1,53$  мкг/см<sup>2</sup>). Наименьшие значения численности в обоих случаях были отмечены на пластинах сроком экспозиции 1 месяц, а наибольшие – на пластинах со сроком 6 (станция 1) и 12 месяцев (станция 2) (табл. 1).



Динамика количественных характеристик перифитонного сообщества инфузорий на пластинах, как и фитоперифитон, имела два выраженных пика развития. Повышение количественных характеристик по истечении 12 месяцев экспозиции наблюдалось на обеих станциях. Однако первый пик развития по станциям не совпадал. На станции 1 он отмечен после 6 месяцев экспозиции, а на станции 2 – через 3 месяца. Вероятно, широкий диапазон показателей был обусловлен сильным влиянием сгонно-нагонных явлений и, как следствие, изменениями уровня минерализации вод в районе постановки эксперимента.

**Макрорастание.** По истечении первого месяца экспозиции на экспериментальных пластинах макроорганизмы отсутствовали. Через 3 месяца от начала эксперимента на образцах, экспонировавшихся в воде на станции 2, были отмечены единичные особи двусторчатого моллюска *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), формирующие друзовые сообщества в устье и дельте Дона (табл. 2).

На пластинах, экспонировавшихся в течение полугода, отмечен резкий рост показателей по сравнению с предыдущим этапом эксперимента. На обеих станциях по численности доминировали мшанки *Fredericella sultana* (Blumenbach, 1779) (Bryozoa: Phylactolaemata). Известно, что мшанки являются одними из наиболее опасных организмов-обрастателей для металлов, погруженных в воду, так как, плотно прикрепляясь к поверхности известковыми домиками, могут повреждать ее [13]. В большом количестве на пластинах присутствовала молодь *Dreissena polymorpha* и ракообразные *Corophium*

*volutator* (Pallas, 1766), формирующие специфические корофиидные илы. Максимальное проективное покрытие обрастателей зафиксировано на станции 2 – до 80 %. Основной вклад в биомассу на станции 1 вносили единичные крупные брюхоногие моллюски *Viviparus viviparus* (Linnaeus, 1758), на станции 2 – *Dreissena polymorpha*.

По истечении 9 месяцев зафиксировано возрастание количественных показателей макрообрастателей на обеих станциях (табл. 2). Наибольший вклад как в биомассу (до 90 %), так и в численность (до 71 %) на обеих станциях вносили моллюски *D. polymorpha*. Численность мшанок значительно сократилась.

В ходе обследования образцов, находящихся в воде в течение 12 месяцев на станции 1, отмечено снижение численности в 1,2, биомассы в 2,7 раза по сравнению с данными, полученными после 9 месяцев экспозиции. На станции 2 показатели снизились в 1,7 и 1,5 раза соответственно. Мшанки и гидроиды на экспериментальных пластинах в этот период отсутствовали. Доминирующим видом по-прежнему выступали моллюски *D. polymorpha*.

В период 15–26.11.2019 г. в р. Дон и в Таганрогском заливе Азовского моря был зафиксирован экстремальный сгон. Падение уровня Дона на некоторых участках превышало 2 м. Температура воздуха в эти дни опускалась до –11 °С. Экспериментальные установки оказались в зоне падения уровня воды, частично оголились и подвергались воздействию отрицательных температур, однако это явление не вызвало массовой гибели организмов, формирующих сообщества обрастания. Вероятно, это

**Таблица 2.** Изменения количественных характеристик сообществ макрообрастания в течение 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев экспозиции  
**Table 2.** Changes in the quantitative characteristics of macro-fouling organisms during 1, 3, 6, 9 and 12 months of exposure

Срок экспозиции Exposure period	Биомасса (г/м <sup>2</sup> ) Biomass (g/m <sup>2</sup> )		Численность (экз/м <sup>2</sup> ) Density (ind/m <sup>2</sup> )		Количество видов Number of species	
	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy
1 месяц экспозиции 1 month of exposure	–	–	–	–	–	–
3 месяца экспозиции 3 months of exposure	–	0,04	–	44	–	1
6 месяцев экспозиции 6 months of exposure	195,05	55,66	2304	11740	5	7
9 месяцев экспозиции 9 months of exposure	240,68	357,76	4444	35244	6	6
12 месяцев экспозиции 12 months of exposure	90,29	233,29	5456	20856	5	5

**Таблица 3.** Результаты измерений твердости по Виккерсу (HV) образцов Д16 в исходном состоянии и после 3, 6, 9, и 12 месяцев экспозиции**Table 3.** The results of measuring the Vickers hardness (HV) of D16 samples in the initial state and after 3, 6, 9 and 12 months of exposition by stations

Условия экспозиции Exposure conditions	3 месяца 3 months	6 месяцев 6 months	9 месяцев 9 months	12 месяцев 12 months
Исходные данные / Initial data	140,75	140,75	140,75	140,75
Кагальник / Kagal'nik	137,50	135,25	134,75	134,25
Донской / Donskoy	137,25	136,00	135,75	135,50

связано с тем, что к моменту экстремального сгона на пластинах сформировалось сообщество с многослойной структурой, характеризующееся относительной стабильностью.

В целом сезонная динамика показателей макрообрастателей на экспериментальных пластинах соответствует общей закономерности: максимальна в теплое время года и резко снижается в позднеосенний и зимний периоды с поправкой на природные явления (колебания температуры и солености, сгоны и т.д.). Плотность поселения макроорганизмов на станции 2 была выше в 3,8–7,9 раза, чем на станции 1, в течение 6–12 месяцев эксперимента.

**Оценка коррозионной стойкости металлических образцов при проведении натурных климатических испытаний.** Проведены металлографические исследования с оценкой глубины межкристаллитной и питтинговой коррозии образцов алюминиевого сплава Д16. Через 3 месяца эксперимента глубина межкристаллитной коррозии сплава Д16 достигла значительной величины и на станции 1 составила 0,7, на станции 2 – 0,941 мм.

После 6 месяцев экспозиции на БНЭБ «Кагальник» глубина питтинговой коррозии образцов сплава Д16 составила 0,815 мм, на ГМП «Донской» носила сквозной характер, глубина межкристаллитной коррозии – 0,790 и 0,941 мм соответственно.

Для пластин, находившихся в воде в течение 9 месяцев, глубина питтинговой коррозии на обеих станциях носила сквозной характер, глубина межкристаллитной коррозии – 0,800 мм (станция 1) и 0,965 мм (станция 2).

При испытаниях в воде образцов в течение 12 месяцев выявлено, что наибольшая площадь коррозионных поражений для сплава Д16 получена на ГМП «Донской» – 50 %, в то время как при испытаниях на БНЭБ «Кагальник» площадь коррозионных поражений не превышает 30 % поверхности. Результаты металлографических исследований показали, что значения после 12 месяцев экспозиции на БНЭБ «Кагальник» и ГМП «Донской» остались

на уровне 9-месячных значений: глубина питтинговой коррозии образцов сплава Д16 носила сквозной характер, глубина межкристаллитной коррозии – 0,810 и 0,981 мм соответственно.

Оценка изменения твердости поверхности образцов показала, что снижение этого показателя для пластин, экспонировавшихся в воде в течение 3 месяцев во всех условиях, незначительно и составляет около 2,3 % (табл. 3).

Изменение показателя твердости для образцов Д16 через 12 месяцев эксперимента на обеих станциях осталось на уровне 6- и 9-месячных значений и не превысило 6,4 % (табл. 3).

В составе продуктов коррозии, снятых с образцов Д16 после 3-месячной экспозиции в воде на ГМП «Донской» и БНЭБ «Кагальник», на поверхности обнаружены в основном алюминий, кислород и сера, а также кремний, натрий, калий (спектры 19, 42) (рис. 5, 6). На поверхности пластин, экспонировавшихся в течение 6 месяцев, помимо обнаруженных ранее отмечен кальций (спектры 31 и 3) (рис. 5, 6). После 9 месяцев экспозиции на обеих станциях в составе продуктов коррозии обнаружены продукты окисления поверхности, о чем свидетельствуют пики кислорода и алюминия. В большом количестве представлены кремний и фосфор, а также элементы, входящие в состав вод зоны проведения эксперименты: кальций, магний, калий (рис. 5, 6).

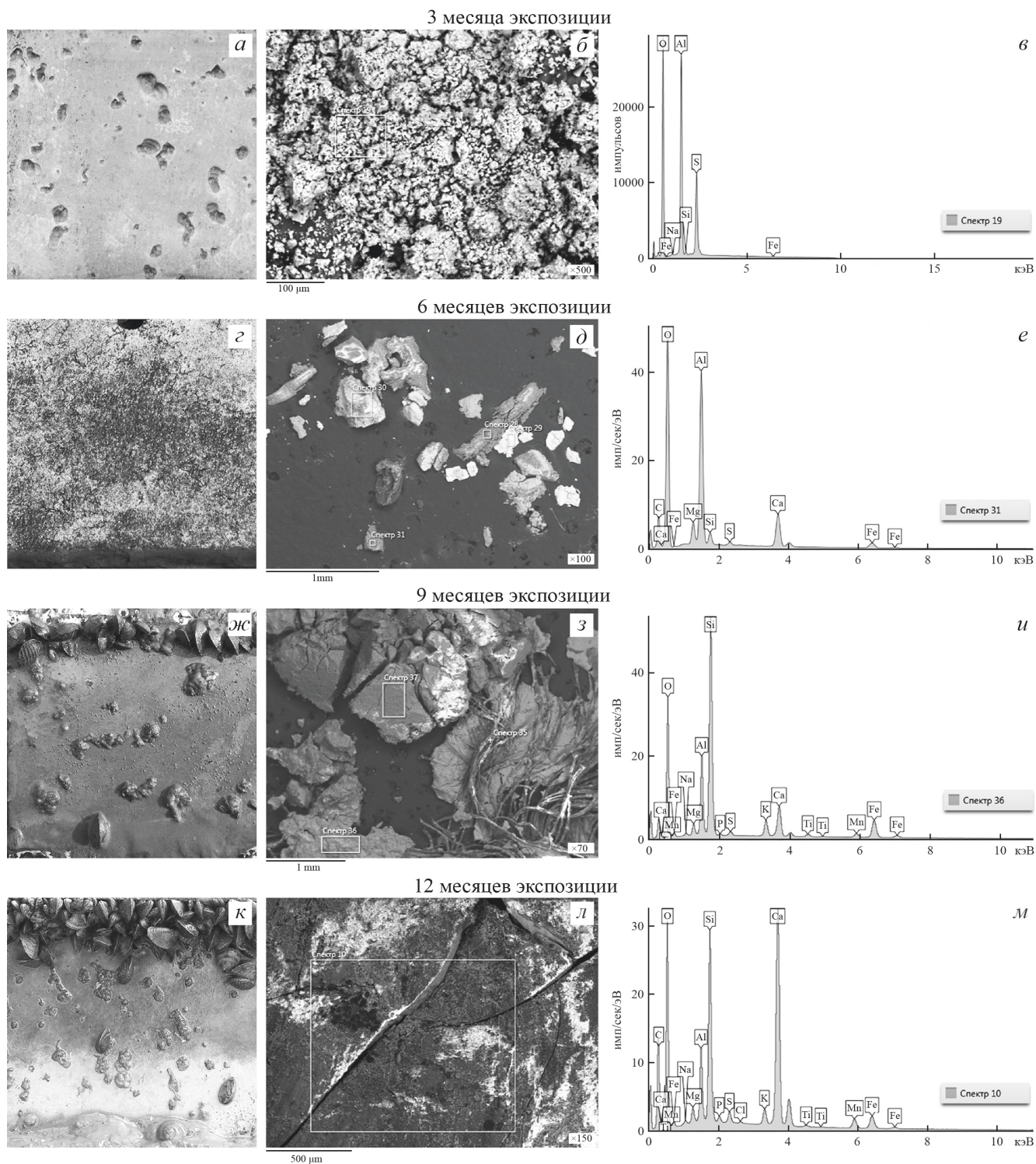
После 12 месяцев экспозиции в составе продуктов коррозии под слоем биообрастателей помимо продуктов окисления поверхности (кислорода и алюминия) обнаружены элементы коррозионно-активной среды – хлор и сера, а также частицы органического происхождения.

## ВЫВОДЫ

Гидрохимические условия акватории проведения эксперимента определялись взаимодействием речных и морских факторов при формировании гидролого-гидрохимического режима. Речные фак-

торы были представлены объемом речного стока, морские – частотой и амплитудой сгонно-нагонных явлений и связанными с ними интрузиями осолоненных вод при нагонах или падением уровня воды

при сгонах. Стоит отметить, что знакопеременные колебания уровня в отдельные периоды формировали на исследуемых участках высокие скорости течений, что следует рассматривать как один из



**Рис. 5.** Анализ состава продуктов коррозии образца Д16, БНЭБ «Кагальник»: а, з, ж, к – внешний вид образца; б, д, з, л – микроструктура; в, е, и, м – локальный химический состав.

**Fig. 5.** Analysis of the composition of corrosion products of sample D16, Coastal Scientific Expedition Base “Kagal’nik”: а, з, ж, к – sample photo; б, д, з, л – microstructure; в, е, и, м – local chemical composition.

факторов, обуславливающий интенсификацию коррозии за счет разрушения слоя продуктов коррозии и притока кислорода, а также как фактор, влияющий на организмы-обрастатели.

По истечении 12 месяцев эксперимента можно сделать вывод, что сообщество обрастания в районе смешения речных и морских вод представляет собой многовидовой биоценоз, схема развития ко-

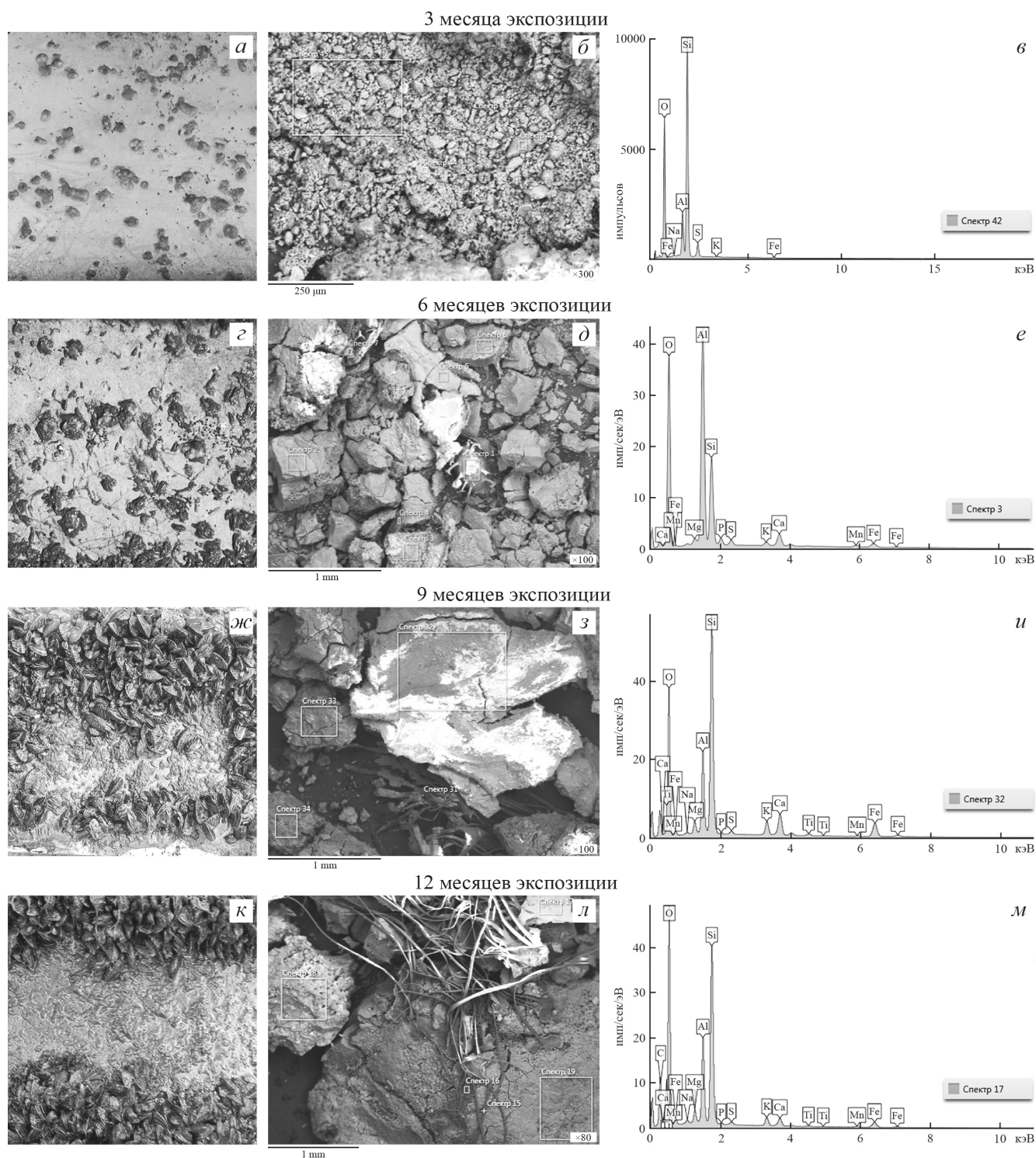


Рис. 6. Анализ состава продуктов коррозии образца Д16, ГМП «Донской»: а, з, ж, к – внешний вид образца; б, д, з, л – микроструктура; в, е, и, м – локальный химический состав.

Fig. 6. Analysis of the composition of corrosion products of sample D16, gauging station “Donskoy”: а, з, ж, к – sample photo; б, д, з, л – microstructure; в, е, и, м – local chemical composition.

того схожа с классической [15]: в начале наблюдений отмечали микрообрастания, состоящие из микробно-диатомовой пленки и цилиосообщества, затем появлялись пионерные макрообрастатели, которые позже замещались постоянными макроорганизмами-обрастателями.

Сукцессионный ход микрофитоперифитона на образцах Д16 в разных участках дельты р. Дон характеризуется двухпиковой кривой с максимумом на девятом месяце экспозиции. На протяжении всего исследования формирование альгоценозов на экспериментальных пластинах в обоих районах связано с доминированием диатомовой флоры. Для микрозооперифитона также выявлено два пика численности и биомассы. Максимальные значения отмечены на станции 1 через 6, а на станции 2 – через 12 месяцев от начала эксперимента. Отмеченные количественные и качественные различия в развитии микрообрастаний связаны с гидролого-гидрохимическими особенностями сравниваемых акваторий.

Формирование сообществ макрообрастания начинается на образцах, находящихся в воде более 3 месяцев. На пластинах, находящихся в воде в течение 6 месяцев, отмечается высокая плотность поселения мшанок. Моллюски рода *Dreissena*, доминирующие на экспериментальных пластинах 9- и 12-месячного срока экспозиции, рассматриваются как наиболее опасные организмы-обрастатели в пресных водоемах. При этом согласно опубликованным данным [4] сплошное сообщество обрастания является основной причиной торможения коррозионного процесса алюминиевых сплавов на небольших глубинах.

В ходе исследований выявлено, что на протяжении всего периода экспозиции наибольшая глубина коррозионных поражений для сплава Д16 была от-

мечена уже в первые 3 месяца экспозиции, а после 6 месяцев испытаний носила сквозной характер.

По результатам определения состава продуктов коррозии, на всех пластинах преобладают продукты окисления поверхности образцов (кислород – алюминий), элементы, входящие в состав солей водной среды мест экспозиции (кальций, калий, натрий, магний), а также элементы органического происхождения: кремний, кислород, кальций и волонистые структуры на углеродной основе.

Сложный состав природных вод и сформировавшееся обрастание не позволяют однозначно оценить влияние отдельных компонентов на скорость коррозии. Микро- и макрообрастания могут как повысить, так и снизить коррозионные процессы. Например, фитоперифитон способствует увеличению коррозии, как и мозаичное прикрепление макрообрастателей [13], а развитие сплошного слоя макрообрастателей и защитного карбонатного остатка способствует торможению коррозионного процесса. Помимо этого известно, что скорость коррозии снижается при формировании на поверхности слоя из продуктов коррозии. Возможно, наметившуюся тенденцию к торможению скорости коррозии, отмеченную для образцов, находившихся в воде в течение 12 месяцев, можно объяснить совокупностью ряда факторов: снижение концентрации растворенного кислорода, уменьшение численности фитоперифитона, формирование на поверхности слоя из продуктов коррозии, развитие сообщества макрообрастания.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-29-05078 мк и темы НИР ГЗ ЮНЦ РАН № АААА-А18-118122790121-5.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаклеина В.А., Замятин В.М. 2010. Влияние коррозионной среды на неоднородность пластических деформаций в микроструктуре алюминиевого сплава Д16. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1: 37–45.
2. ГОСТ 9.021-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию. 1993. М., Издательство стандартов: 6 с.
3. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. 1986. *Коррозия и защита алюминиевых сплавов*. М., Металлургия: 368 с.
4. Синявский В.С., Калинин В.Д. 2005. Коррозия и способы защиты алюминиевых сплавов в морской воде соответственно их составу и структуре. *Защита металлов*. 41(4): 347–359.
5. Варченко Е.А., Курс М.Г. 2018. Щелевая коррозия алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей в морской воде. *Труды ВИИМ*. 7(67): 96–105. doi: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105
6. Тагирли Г.М., Вердиев С.Ч., Агаларова Т.М., Велиева С.М., Ширинов Т.И., Джафарова С.З. 2017. Коррозионное поведение некоторых металлов и сплавов в пресных природных водах. *Kimya problemləri*. 1: 98–105.
7. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений*. 1983. Л., Гидрометеиздат: 239 с.
8. Мамаев О.И. 1987. *Термохалинный анализ вод Мирового океана*. Л., Гидрометеиздат: 296 с.
9. ASTM E2546-15. 2015. *Standard Practice for Instrumented Indentation Testing*, ASTM International, West Conshohocken, PA. URL: <https://www.astm.org> (дата обращения: 25.03.2020). doi: 10.1520/E2546-15

10. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2017. Причины осолонения Таганрогского залива. *Доклады Академии наук*. 477(1): 92–96. doi: 10.7868/S086956521731019X
11. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2018. Маловодье и роль грунтовых вод в осолонении авандельты Дона. *Доклады Академии наук*. 483(4): 444–448. doi: 10.31857/S086956520003284-5
12. Матишов Г.Г., Булышева Н.И., Клещенко А.В. 2020. Особенности динамики оседания макрообратателей на экспериментальные пластины в зоне смешения речных и морских вод. В кн.: *КЛИМАТ-2020: Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы (10–11 сентября 2020 г., Москва)*. М., изд-во ВИАМ: 285–295.
13. Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Полтаруха О.П., Ильин И.Н. 2007. *Комплексный подход к защите от морского обрастания и коррозии*. М., Товарищество научных изданий КМК: 152 с.
14. Беляева П.Г. 2002. Фитоперифитон среднего течения р. Сыла (бассейн Камы). В кн.: *Материалы XII международной конференции молодых ученых «Биология внутренних вод: проблемы экологии и биоразнообразия» (Борок, 23–26 сентября 2002 г.)*. Борок, изд-во Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН: 3–10.
15. Scheer B.T. 1945. The development of marine fouling communities. *The Biological Bulletin*. 89(1): 103–121. doi: 10.2307/1538088
6. Tagirli G.M., Verdiev S.Ch., Agalarova T.M., Valiyeva S.M., Shirinov T.I., Jafarova S.Z. 2017. [Corrosion behavior of some metals and alloys in fresh natural waters]. *Kimya problemləri*. 1: 98–105. (In Russian).
7. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozheniy*. [Guidance on methods of hydrobiological analysis of surface water and bottom sediments]. 1983. Leningrad, Gidrometeoizdat: 239 p. (In Russian).
8. Mamaev O.I. 1987. *Termohalinnyy analiz vod Mirovogo okeana*. [Thermohaline analysis of the waters of the World Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 296 p. (In Russian).
9. ASTM E2546-15. 2015. *Standard Practice for Instrumented Indentation Testing*, ASTM International, West Conshohocken, PA. Available at: <https://www.astm.org> (accessed 25 March 2020). doi: 10.1520/E2546-15.
10. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2017. Causes of salinization of the Gulf of Taganrog. *Doklady Earth Sciences*. 477(1): 1311–1315. doi: 10.1134/S1028334X17110034
11. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2018. Water scarcity and the role of groundwater in salinization of the Don Avandelta. *Doklady Earth Sciences*. 483(2): 1528–1533. doi: 10.1134/S1028334X18120073
12. Matishov G.G., Bulysheva N.I., Kleshchenkov A.V. 2020. [Features of the dynamics of settling of macro-fouling on experimental plates in the mixing zone of river and sea waters]. In: *KLIMAT-2020: Sovremennyye podkhody k otsenke vozdeystviya vneshnikh faktorov na materialy i slozhnyye tekhnicheskie sistemy*. [CLIMATE-2020: Modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems (Moscow, Russia, 10–11 September 2020)]. Moscow, All-Russian Research Institute of Aviation Materials: 285–295. (In Russian).
13. Karpov V.A., Koval'chuk Yu.L., Poltarukha O.P., Il'in I.N. 2007. *Kompleksnyy podkhod k zashchite ot morskogo obrastaniya i korrozii*. [A comprehensive approach to protection against marine fouling and corrosion]. Moscow, KMK Scientific Press Ltd.: 152 p. (In Russian).
14. Belyaeva P.G. 2002. [Phytoperiphyton of the middle course of the river Sylva (Kama basin)]. In: *Materialy XII mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh "Biologiya vnutrennikh vod: problemy ekologii i bioraznoobraziya"*. [Proceedings of the XII International Conference of Young Scientists "Biology of Inland Waters: problems of ecology and biodiversity" (Borok, Russia, 23–26 September 2002)]. Borok, I.D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences: 3–10. (In Russian).
15. Scheer B.T. 1945. The development of marine fouling communities. *The Biological Bulletin*. 89(1): 103–121. doi: 10.2307/1538088

## REFERENCES

1. Shakleina V.A., Zamyatin V.M. 2010. Effect of corrosion medium on the nonuniformity of plastic microstrains in the microstructure of D16 aluminum alloy. *Metal Science and Heat Treatment*. 52: 25–31. doi: 10.1007/s11041-010-9225-6
2. *GOST 9.021-74. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Alyuminiy i splavy alyuminiyevye. Metody uskorenykh ispytaniy na mezhkristallitnyuyu korroziyu*. [Unified system of protection against corrosion and aging. Aluminum and aluminum alloys. Accelerated test methods for intergranular corrosion]. 1993. Moscow, Izdatel'stvo standartov: 6 p. (In Russian).
3. Sinyavskiy V.S., Val'kov V.D., Kalinin V.D. 1986. *Korroziya i zashchita alyuminiyevykh splavov*. [Corrosion and protection of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya: 368 p. (In Russian).
4. Sinyavskiy V.S., Kalinin V.D. 2005. Marine corrosion and protection of aluminum alloys according to their composition and structure. *Protection of Metals*. 41(4): 317–328.
5. Varchenko E.A., Kurs M.G. 2018. [Crevice corrosion of aluminum alloys and stainless steel in marine water]. *Trudy VIAM*. 7(67): 96–105. (In Russian). doi: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105

Поступила 30.07.2021