

УДК 57.045+57.047:67.017  
DOI: 10.7868/S25000640200207

## ЭСТУАРИИ АЗОВСКОГО МОРЯ – УНИКАЛЬНЫЕ ПОЛИГОНЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОКОРРОЗИИ. ОПЫТ ПОСТАНОВКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

© 2020 г. Академик Г.Г. Матишов<sup>1,2</sup>, Н.И. Булышева<sup>1</sup>, А.В. Клещенков<sup>1</sup>,  
Г.Ю. Глущенко<sup>1</sup>, Е.А. Варченко<sup>3</sup>, А.А. Гончаров<sup>3</sup>, А.В. Гладких<sup>3</sup>

**Аннотация.** С декабря 2018 г. в устьевой области р. Дон в зоне смешения речных и морских вод на стационарах Южного научного центра Российской академии наук – береговой научно-экспедиционной базе «Кагальник» и гидрометеопосту «Донской» – проводятся стендовые испытания по изучению совместного влияния климатических и биологических факторов на экспериментальные пластины, изготовленные из сталей марок 30ХГСА и Ст3 и алюминиевых сплавов марок АМг6 и Д16.

В этой акватории наблюдался достаточно агрессивный гидрологический режим, который характеризовался общим повышенным фоном солености (до 3–3,5 единиц практической солености) и низкими значениями температуры с частыми переходами через 0 °С с 20 декабря 2018 г. по 26 февраля 2019 г. и дальнейшим ростом температуры. В мае 2019 г. установился стабильный термохалинный режим.

При исследовании формирования сообществ обрастания на экспериментальных пластинах для микроводорослей отмечен рост количественных характеристик с декабря по апрель, а затем его снижение. В течение всего периода наблюдений среди микрообрастаний доминировали диатомовые водоросли. Для макрообрастателей количественные показатели постепенно увеличиваются с декабря по июнь. Заселение пластин макробеспозвоночными началось со стали 30 ХГСА. По результатам трех месяцев испытаний наибольшая скорость коррозии отмечена на образцах всех марок на атмосферных стендах БНЭБ «Кагальник». При испытаниях в воде наибольшая скорость коррозии образцов сталей 30ХГСА и Ст3 была получена на станции БНЭБ «Кагальник», а наибольшая скорость коррозии образцов сплавов Д16 и АМг6 – на станции ГМП «Донской». Оценка изменения твердости поверхности образцов металлических материалов показала наибольшее снижение данного показателя для образцов стали 30ХГСА – 17 % на атмосферном стенде, при испытаниях в воде снижение показателя составило 6,5 % независимо от станции экспонирования.

**Ключевые слова:** биокоррозия, деструкция, сообщества обрастаний, устьевая область, зона смешения вод, гидроклиматические факторы, Азовское море, металлоконструкции.

### ESTUARIES OF THE SEA OF AZOV AS UNIQUE POLYGONS FOR RESEARCH OF BIOCORROSION. EXPERIENCE IN SETTING UP AN EXPERIMENT

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>, E.A. Varchenko<sup>3</sup>, A.A. Goncharov<sup>3</sup>, A.V. Gladkikh<sup>3</sup>

**Abstract.** Since December 2018, bench tests to study the combined effect of climatic and biological factors on experimental plates have been conducted in the estuary of the Don River in the zone of mixing of river and sea waters at the training centers of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: Coastal

<sup>1</sup> Федеральное исследовательское учреждение 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 научно-исследовательского 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 кр., г. Геленджик, ул. Почтовая, 20

Scientific Expedition Base “Kagal’nik” and gauging station “Donskoy”. The plates were made of steel (grades 30HGSA and St3) and aluminum alloys (grades AMg6 and D16).

In this water area, a rather aggressive hydrological regime was observed, which was characterized by a general increased background of salinity up to 3–3.5 practical salinity units and low temperature values, with frequent transitions through 0 °C from December 20, 2018 to February 26, 2019 and a further increase in temperature. In May 2019, a stable thermohaline regimen was established.

When studying the formation of fouling communities on the experimental plates, the growth of quantitative characteristics from December to April was noted for microalgae. Then their decrease is observed. Throughout the entire period, diatoms dominated among microgrowths. For macro-fouling, quantitative indicators gradually increase from December to June. Population of plates by macroinvertebrates began with steel 30HGSA. According to the results of 3 months of testing, the highest corrosion rate was noted on samples of all grades on the atmospheric stands of the “Kagal’nik”. When tested in water, the highest corrosion rate of samples of 30HGSA and St3 steels was obtained at the “Kagal’nik”, and the highest corrosion rate at samples of D16 and AMg6 alloys was obtained at the “Donskoy”. Assessment of changes in the surface hardness of the metallic materials samples showed the largest decrease in this indicator for steel samples 30HGSA – 17 % at an atmospheric stand, while testing in water, the decrease was 6.5 % regardless of the exposure station.

**Keywords:** biocorrosion, destruction, fouling communities, estuary, water mixing zone, hydroclimatic conditions, Sea of Azov, metal structures.

## ВВЕДЕНИЕ

Эстуарии, несмотря на свои относительно небольшие размеры, занимают особое место как среди природных экосистем, так и среди территориально-хозяйственных комплексов. Вместе с тем использование этих акваторий затруднено из-за большой изменчивости их морфологических, гидрологических, гидрохимических, экологических характеристик кратковременного (штормы, сгонно-нагонные явления) и сезонного (половодье, межень) масштабов. Устьевые области являются областями аккумуляции загрязненных речных вод, несущих в себе отходы промышленности, в том числе и токсичные вещества, которые оказывают влияние не только на живые организмы, но и на субстрат. При этом зона смешения морских и речных вод обладает рядом особенностей.

Качество водной среды, ее агрессивность к субстрату и организмам определяется совокупностью свойств природы эстуариев аридной зоны. К основным факторам воздействия следует отнести химический состав воды в дельте Дона и на взморье, принимая во внимание сезонную динамику и сгонно-нагонные явления, размах вертикальных колебаний уровня воды по отношению к Кронштадскому футштоку с учетом календарных дней при сгонах и нагонах, взаимодействие водной поверхности с атмосферными потоками.

Активное влияние на подводный субстрат могут оказывать биотические элементы: остатки помета колониальных птиц (соединения аммиака, фос-

фора), цветение сине-зеленых водорослей (цианопрокариот, цианобактерий), продуцирующих при отмирании вещество, подобное дусту, обрастания субстрата и организмов, – а также индустриальное загрязнение.

«Эффект дуста» (одорантов) является производным цветения воды и сезонного разложения гетеротрофными организмами цианопрокариот из родов *Aphanizomenon* Morren ex Bornet & Flahault, 1886, *Dolichospermum* (Ralfs ex Bornet & Flahault) Wacklin, Hoffmann & Komárek, 2009, *Microcystis* Lemmermann, 1907 и *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont, 1892. Массовое развитие цианопрокариот в Таганрогском заливе (рис. 1) обычно начинается в июле при температуре воды +24... +29 °C и достигает максимума в августе – сентябре. Массовое отмирание этих микроорганизмов происходит в обстановке аномальной для взморья (2–5 ‰) солёности воды [1]. Образуется громадный объем разлагающихся органических веществ, которые насыщают воду продуктами метаболизма (геосмином, фенолами). Последние, соединяясь со свободным (молекулярным) хлором, образуют хлорфенолы, запах которых напоминает запах дуста. Карповые рыбы при долгом нахождении в местах скопления отмирающих водорослей приобретают устойчивый запах дуста. Очевидно, происходит накопление хлорфенолов и одорантов в тканях рыб. От резкого запаха дуста в мясе рыбы не удавалось избавиться ни при термической обработке, ни при ее выдерживании в проточной воде. Одоранты имеют крайне низкий порог обнаружения органами чувств, так, например, запах

геосмина ощущается на уровне 0,001–0,02 мкг/л, 2-метилизоборнеола – 0,002–0,04 мкг/л [2].

Дельта Дона и примыкающий к ней участок Таганрогского залива – это ключевая орнитологическая территория национального значения. На островах и побережье находятся смешанные колонии птиц, где многочисленным видом является большой баклан *Phalacrocorax carbo* Linnaeus, 1758. Большой баклан оказывает значительное влияние в процессе гнездостроения на субстрат в пределах своей колонии и в местах добывания пищи. На донском взморье экскременты этих птиц толстым слоем покрывают солнечные батареи навигационных створов, ускоряя их выход из строя, а также деревья в прибрежных насаждениях, способствуя образованию сухостоя и гибели леса. Известно, что *Ph. carbo* наносит вред металлическим вышкам, его экскременты, состоящие на 16,3 % из азота, 15,4 – фосфора, 8,5 – калия, 24 – кальция и 7,4 – марганца [3], приводят к ускорению процессов коррозии [4]. Вместе с тем гуано птиц – эффективное удобрение, которое насыщает активным веществом прилегающую водную среду.

Крупные гнездовые колонии (более 4 тыс. пар) располагаются на островах Малый и Большой Дворяны и ерике Бирючий в дельте Дона. В 2015–2016 гг. здесь размножалось около 4–5 тыс. пар большого баклана [5]. В ходе наблюдений сотрудниками Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) отмечено, что гидрометеопосты (ГМП) ЮНЦ РАН «Кагальник» и «Донской» активно используются птицами для отдыха. В 2018–2019 гг. наибольшая численность большого баклана зафиксирована в конце августа 2018 г. (18100 особей), наименьшая – в конце октября (2530 особей).

Продукты жизнедеятельности водных и околоводных животных – коррозионно-активные агенты, которые наряду с организмами-обрастателями способствуют возрастанию скорости коррозии металлоконструкций в водной среде в десятки раз. Процессы коррозии необратимы, в связи с чем необходимо выявлять их на ранних стадиях, давать количественную оценку коррозионного повреждения, прогнозировать опасность развития в случае отсутствия мер по антикоррозионной защите. Среди прибрежных районов наибольший интерес представляют эстуарии, в пределах которых, как правило, наблюдаются наибольшие диапазоны и градиенты изменения абиотических факторов (климатических, гидрологических, гидрохимических

и др.). Поэтому проведение исследований биокоррозии металлов в зоне смешения морских и речных вод в настоящее время приобретает особую актуальность для понимания закономерностей воздействия изменчивых условий среды и организмов-обрастателей на конструкции.

Специальные работы по изучению воздействия организмов-обрастателей на металлы в российском секторе Азовского моря в зоне смешения речных и морских вод ранее не проводились.

Результаты эксперимента в дальнейшем могут быть использованы для выработки практических рекомендаций по защите от биообрастаний в эстуарных условиях Приазовья.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Начиная с 2018 г. ЮНЦ РАН совместно с Геленджикским центром климатических испытаний им. Г.В. Акимова Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов проводит в дельте Дона натурные испытания коррозионной стойкости металлов и сплавов под воздействием климатических и биологических факторов. Одной из ключевых задач таких исследований является определение динамики оседания организмов-обрастателей на экспериментальные пластины.

Под термином «обрастание» понимают комплекс растений и животных, прикрепленных на естественный и искусственный субстрат [6–10]. В работе по изучению обрастаний с помощью экспериментальных пластин (металлов) авторы придерживались стандартизированной методики [11].

19 декабря 2018 г. в районе стационаров ЮНЦ РАН – береговой научно-экспедиционной базы (БНЭБ) «Кагальник» (станция 1, рукав Свиное гирло) и гидрометеопоста (ГМП) «Донской» (станция 2, рукав Старый Дон) – на глубине 2 м были установлены две серии экспериментальных пластин площадью 15 × 15 см, изготовленных из алюминиевых сплавов марок АМг6 и Д16 и углеродистых сталей марок 30ХГСА и Ст3. В качестве контрольных образцов, не склонных к обрастанию, были использованы пластины из органического стекла марки АО-120 (нейтральный материал). Схема расположения станций представлена на рисунке 1.

Важным элементом дистанционного мониторинга ЮНЦ РАН стали стационарные гидрометеопосты в авандельте (Кагальник, Донской) и на взморье

в Таганрогском заливе. Анализ базы данных ЮИЦ РАН, содержащей непрерывные записи гидрозондов: термохалинные характеристики, ежедневную регистрацию колебаний уровня воды в дельте и на взморье, на гидрологическом разрезе Азов – Керчь, – представил для экспериментов океанографическую опору. Наблюдения за параметрами среды с помощью погружных термосоленографов, зондов AANDERAA RCM 9 LW и CTD-90M начаты с момента установки экспериментальных стенов. В ходе исследования непрерывно фиксировались показатели температуры и солености воды. Для обработки данных использовали средства статистической обработки Microsoft Excel, Matlab. Внутривековая динамика донского стока была рассчитана за период с 1940 по 2019 г. В условиях естественного маловодного цикла, приводящего к трансформации термохалинного режима Азовского моря, выявлены новые, ранее не изученные гидрохимические тенденции, включая эпизоды осолонения воды в дельте Дона.

Несмотря на расстояние в 3,2 км между гидрометеопостами с пластинами в обеих точках складывались сходные гидрометеорологические параметры. Однако вместе с тем химический состав вод имеет отличия: в рукаве Старый Дон наблюдается свободное проникновение морских вод. Напротив, Свиное гирло во время ветровых сгонов практически полностью изолируется от речных вод Дона мелководными порогами. По этой причине при сгонах гирло Свиное полностью заливается минерализованными водами р. Кагальник, которые имеют сульфатно-кальциевый состав [12] в отличие от хлоридно-натриевого в морской воде. Минерализация этих вод может достигать 5–7 г/л и более.

Исследование микроструктуры поверхности образцов, а также определение локального химического состава продуктов коррозии проводили в 2 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. Второй этап – элементарный анализ экспериментальных пластинок, который проводили с помощью электронного сканирующего микроскопа 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 осуществляли на эталонном образце кобальта. Время накопления спектров – 50 с.

Определение твердости проводили по ASTM E2546-15 [13] по методу Виккерса. Твердость определяли алмазной пирамидкой по Виккерсу при нагрузке 100 Н и скорости нагружения 0,5 мм/с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

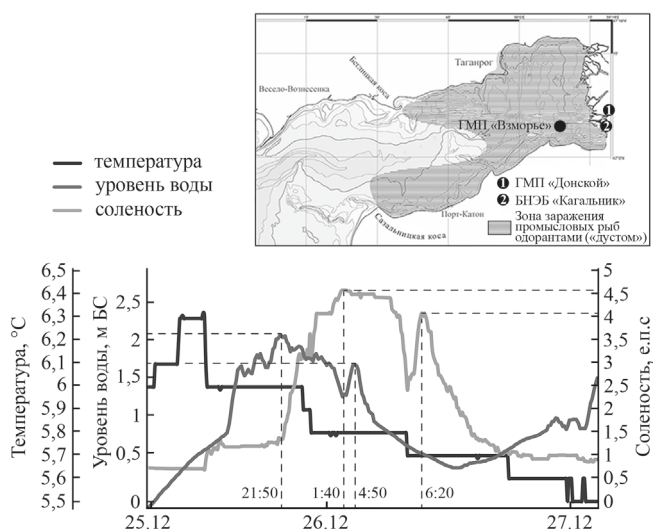
**Гидрологические особенности акватории эксперимента.** Среди факторов, определяющих физико-географическую обстановку в устье Дона и на взморье, ключевыми являются сгонно-нагонные колебания уровня воды. Нагоны вызываются сильными западными ветрами (низовками), сгоны – восточными (верховками). Экстремальный сгон на взморье – характерное явление в этом районе [1; 12]. В XXI веке термохалинный режим дельты Дона претерпевает аномальные трансформации в связи с маловодьем Дона. Усилились тенденции аридизации климата и сокращение сбросов воды вниз по р. Дон через Цимлянский гидроузел. Размах колебаний уровня воды возрос до не наблюдававшихся ранее значений как по амплитуде, так и по продолжительности циклов. Холодный январь 2008 г. – в числе первых десяти самых холодных январей с 1891 г. в Южном федеральном округе. Продолжительность ледостава в восточной части Таганрогского залива достигла 70 дней. На первый взгляд известные процессы все больше приобретают явно аномальные формы и еще мало изучены. В их числе осолонение Таганрогского залива, обмеление русла Дона, экстремальные сгоны воды на взморье и зарастание авандельты, миграция представителей азовоморской фауны в дельту Дона, дефицит водных ресурсов и критическое состояние воспроизводства ценных рыб в Азово-Донском бассейне.

Причины беспрецедентных преобразований в дельте и на взморье кроются во внутривековой цикличности климата (30, 60 лет) и наложившихся деструктивных обстоятельствах, нараставших после перекрытия долины Дона Цимлянской плотинной в 1952 г. Специфика эстуарной среды в условиях маловодья XXI века – это рост количества дней с крайне низким стоянием уровня воды во все сезоны года. В условиях аридизации климата экстремальные сгоны и обмеление дельты Дона с аномальным размахом проявились в 2015 и 2016 гг. Осенью 2016 г. в результате крайне малых сбросов воды из Цимлянского водохранилища (180–300 м<sup>3</sup>/с) и чрезвычайных по продолжительности восточных ветрах (14 суток) произошел экстремальный сгон воды на Нижнем Дону.

Одно-, двухнедельные серии сгонов прерывались кратковременным действием (2–3 дня) западных ветров, приводивших к сильным (в 2016 г.) нагонам с подъемом уровня до 1 м. В 2016 г. за двое суток уровень воды под напором устойчивого восточного ветра упал на 2,43 м и продержался на этой отметке рекордные 16 дней. Аналогичное явление наблюдалось в марте 2013 г. и в сентябре 2014 г., когда экстремальный сгон стремительно сменился невиданным нагоном, а амплитуда колебаний уровня воды превысила 4 м. За период экспериментальных наблюдений зафиксирован ряд нагонов и сгонов (рис. 1).

Температурный режим на стационарах во время эксперимента складывался по стандартной для района исследований схеме. Температура воды в придонном слое варьировала в первые три месяца экспонирования (19 декабря 2018 г. – 19 марта 2019 г.) от 0 до +5 °С. Ледостав из тонкого льда наблюдался 18–25 декабря 2018 г. и 8–28 января 2019 г. Образование льда отмечено 25 февраля 2019 г. (неполный ледостав), с 26 февраля по 1 марта – ледовые явления в виде приносного льда, заберегов. Полное очищение ото льда зафиксировано 5 марта 2019 г. Устойчивый весенний рост температуры воды начался с 28 февраля 2019 г. В период с 20 по 30 марта значения температуры колебались в районе отметки 6 °С, затем отмечен стабильный рост до 10–11 °С до 13 апреля, после чего наблюдался сгон воды, при котором температура воды упала до 5 °С, затем до конца мая температура росла и достигла величины 20 °С. В первые дни июня воды устья Дона прогрелись до 25 °С, такая температура сохранялась до 27 июня 2019 г. (извлечение образцов по истечении 6 месяцев экспонирования).

**Гидрохимические условия эксперимента.** Зоогеографической границей для пресной и морской фауны является узкий соленостный диапазон от 4 до 7 ‰. В Азовском море пресноводные формы зообентоса не заходят за изогалину выше 4–5 ‰. Воду по солености можно подразделить следующим образом: питьевая 0,4–1,0 ‰; пресная (речная) 0,4–2,0 ‰; слабосоленоватая 2,0–4,0 ‰; солоноватая 4,0–8,0 ‰; высокосоленоватая (морская) 8,0–17,0 ‰; соленая океаническая 18,0–35,0 ‰ [1]. Мизерный речной сток в условиях ветрового сгона воды на 1–1,5 м ниже нормы обуславливает азово-черноморскую адвекцию вод по Дону до Ростова-на-Дону. В результате взморье, рукава и протоки постоянно длительное время заполняются водой с соленостью от 1 до 5 ‰ [1].



**Рис. 1.** Термохалинные характеристики устьевой области Дона на ГМП «Донской» во время нагона 25–27 декабря 2018 г.

**Fig. 1.** Thermohaline characteristics of the mouth area of the Don River at the gauging station “Donskoy” during the surge on December 25–27, 2018.

Во время нагонов в дельту Дона перемещается зона смешения морских и речных вод. Вода характеризуется смешанным ионным составом. В ней повышается общая минерализация, жесткость и содержание хлоридов. В отобранных пробах воды во время нагонов 5 и 11 марта 2019 г. на БНЭБ «Кагальник» среди анионов преобладал хлорид-ион, а среди катионов натрия и калий, при этом минерализация составила 2,7 и 3,4 г/л соответственно. При верховках более заметным становится феномен наличия слабосоленоватой (2–4 ‰) воды, то есть причиной затока в дельту солоноватых вод не всегда является сильный нагон. При осушении взморья и мелких протоков на речную среду влияют солоноватые подземные воды. Не исключена связь с остаточным стоком осолоненных вод после нагонных явлений [12].

Гидрохимические условия дельты Дона в период с декабря по март определяются пониженным речным стоком, характерным для периода зимней межени, повышенной долей подземного питания, поступлением более минерализованной воды из р. Кагальник в акваторию БНЭБ «Кагальник». Во время нагонов в январе, феврале и марте характерно поступление осолоненных вод Таганрогского залива. В период с апреля по июнь отмечается влияние весеннего половодья, способствующего некоторому понижению минерализации воды.

Ионный состав воды на участке БНЭБ «Кагальник», по классификации О.А. Алекина, пре-

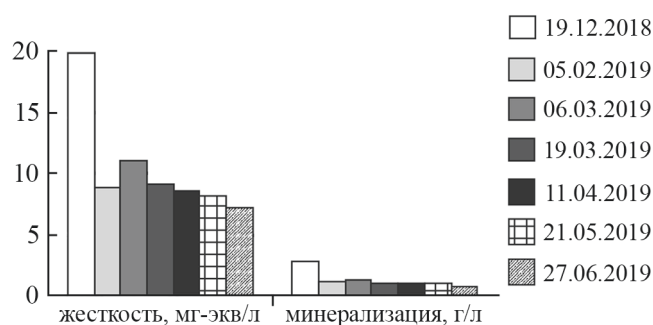


Рис. 2. Изменение общей жесткости и минерализации воды на участке экспозиции БНЭБ «Кагальник».

Fig. 2. Change in the general hardness and mineralization of water at the exposure site near the Coastal Scientific Expedition Base "Kagal'nik".

имущественно относится к сульфатному классу кальциевой группы. Исключением являются случаи повышенного подземного питания собственно рукавов дельты Дона, а также поступление вод р. Кагальник в условиях устойчивой стратификации в зимний период. В это время вода данного участка относится к сульфатному классу натриевой группы. Жесткость воды на взморье закономерно изменялась от 19,8 мг-экв/л в декабре 2018 г. до 8,8–11 мг-экв/л в феврале – марте 2019 г. (рис. 2), значения минерализации составили 2,8 мг/л в декабре 2018 г., 1,1–1,3 мг/л в феврале – марте 2019 г., и 0,7–1,1 мг/л в апреле – июне 2019 г., то есть вода была от слабосоленовой до пресной речной. Общая минерализация зимой и в начале весны фиксировалась на уровне 0,82–1,1 мг/л, но с наступлением половодья и увеличением объема речного стока понизилась до 0,7 мг/л. Значения водородного показателя изменялись в диапазоне 8,2–8,6.

Величина солености воды – важный лимитирующий фактор для гидробиологических и коррозионных процессов. Период эксперимента с 20 марта по 30 июня 2019 г. можно разделить на 4 временных промежутка. Первый, с 20 до 30 марта, характеризуется частым заполнением гирла Свиного подземными водами, общим повышенным уровнем солености, сгонно-нагонными колебаниями уровня воды и стабильными показаниями температуры. Второй отличается весенним ростом температуры при таком же нестабильном уровне воды и солености. Во время третьего временного отрезка практически прекращаются эпизоды заполнения водотоков минерализованными подземными водами, общий уровень солености понижается до фонового, сгонно-нагонный режим так же нестабилен, температура воды возрастает до 20 °С. Четвертый пери-

од – летней межени, температура достигает летних отметок, минерализация при редких и коротких сгонах держится на уровне средней минерализации Нижнего Дона.

Биогенные элементы. Для сезонного хода минеральных форм биогенных элементов в дельте Дона повсеместно характерен зимний максимум и весенне-летний минимум, при этом наибольшие внутригодовые колебания отмечены для минерального азота, менее выраженные – для соединений кремния [14]. В рассматриваемый период концентрация минеральных форм биогенных элементов на участке БНЭБ «Кагальник» изменялась слабо и в целом соответствовала среднемноголетним значениям. Содержание минерального азота (аммонийный, нитратный и нитритный ионы) изменялось от 0,9 до 1,8 мг N/л (среднемноголетнее значение ( $C_{cp}$ ) = 1,09 мг N/л), концентрация фосфат-иона – от 0,11 до 0,13 мг P/л ( $C_{cp}$  = 0,12 мг P/л).

В рукаве Старый Дон в акватории у ГМП «Донской» были отмечены значения концентраций минеральных форм азота и фосфора, близкие к таковым на участке БНЭБ «Кагальник». Так, содержание минерального азота (аммонийный, нитратный и нитритный ионы) изменялось от 1,09 до 1,67 мг N/л ( $C_{cp}$  = 1,09 мг N/л), концентрация фосфат-иона – от 0,10 до 0,12 мг P/л ( $C_{cp}$  = 0,12 мг P/л).

Концентрация валового фосфора была в пределах 0,17–0,21 мг P/л ( $C_{cp}$  = 0,19 мг P/л), общего растворенного фосфора – 0,14–0,21 мг P/л ( $C_{cp}$  = 0,16 мг P/л), валового азота – 1,94–2,3 мг N/л ( $C_{cp}$  = 1,99 мг N/л), общего растворенного азота 1,8–2,33 мг N/л ( $C_{cp}$  = 1,73 мг N/л). Концентрация соединений кремния в акватории у БНЭБ «Кагальник» в исследуемый период изменялась от 5,65 до 6,2 мг Si/л, на ГМП «Донской» – от 5,68 до 6,61 мг Si/л, что соответствует среднемноголетним значениям во время зимнего максимума концентраций кремния в воде.

**Мониторинг сообществ биообрастания на экспериментальных пластинах.** Постоянные колебания солености и уровня воды в авандельте, связанные с частыми сгонно-нагонными явлениями, оказывают ключевое влияние на структуру и количественные показатели гидробиологических сообществ, в том числе и обрастателей. Для акватории исследований составлены видовые списки организмов, отмеченных в сообществах микро- и макрообрастаний. Всего в составе фитоперифитона обнаружено 109 таксонов водорослей и цианопрокариот рангом ниже рода, 16 видов макрозообентоса.

Фитоперифитон. Формирование сообществ и количественная динамика микроводорослей на металлических пластинах связана с доминированием диатомовой флоры. По истечении одного месяца экспозиции наиболее часто встречаемыми были представители перифитонной и бентосной флоры отдела Bacillariophyta родов *Navicula* Bory, 1822, *Stausirella* Williams & Round, 1988, *Melosira* Agardh, 1824, *Cymbella* Agardh, 1830, *Ulnaria* (Kützing) Compere, 2001, *Amphora* Ehrenberg ex Kützing, 1844, *Diatoma* Bory, 1824, *Gomphonema* Ehrenberg, 1832, *Stausira* Ehrenberg, 1843, *Surirella* Turpin, 1828, *Cymatopleura* W. Smith, 1851. Также были отмечены осевшие на пластины представители планктонной флоры (*Melosira varians* Agardh, *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen, виды рода *Cyclotella* (Kützing) Brébisson, 1838).

По истечении одного месяца экспозиции число видов диатомовых водорослей на пластинах изменялось от 5 до 29. Меньшее количество видов и частота встречаемости были у водорослей из отделов Chorophyta (7 видов), Cryptophyta (2 вида), Euglenophyta (1 вид) и Dinophyta (1 вид). Соскоб водорослей со стальных экспериментальных пластин показал незначительное количество фитообразителей. Численность водорослей на таких пластинах варьировала от 2 до 17 кл./см<sup>2</sup>, биомасса от 0,005 до 0,044 мкг/см<sup>2</sup>. Средняя численность перифитонных водорослей после одного месяца экспозиции пластин в водоеме составила  $37 \pm 29$  кл./см<sup>2</sup>, биомасса –  $0,09 \pm 0,07$  мкг/см<sup>2</sup>. Всего было отмечено 40 видов водорослей.

Спустя три месяца экспозиции на пластинах продолжали доминировать диатомовые водоросли. Увеличились их количественные показатели: частота встречаемости, видовое разнообразие, численность и биомасса. Основными представителями отдела Bacillariophyta были перифитонные, бентосные и планктонные виды родов *Navicula*, *Nitzschia* Hassall, 1845, *Diatoma*, *Cymbella*, *Melosira*, *Amphora*, *Thalassiosira* Cleve, 1873. По истечении трех месяцев экспозиции в водоеме средняя численность перифитонных водорослей на экспериментальных пластинах составила  $959 \pm 909$  кл./см<sup>2</sup>, биомасса –  $2,20 \pm 2,00$  мкг/см<sup>2</sup>, число видов изменялось от 17 до 31, общее количество таксонов рангом ниже рода увеличилось до 73. На стальных пластинах на обеих станциях значения биомассы составляли 1,05–1,18 мкг/см<sup>2</sup> (рис. 3), численности – 387–488 кл./см<sup>2</sup>. Наименьшее количество фитоперифитона на БНЭБ «Кагальник» отмечено на

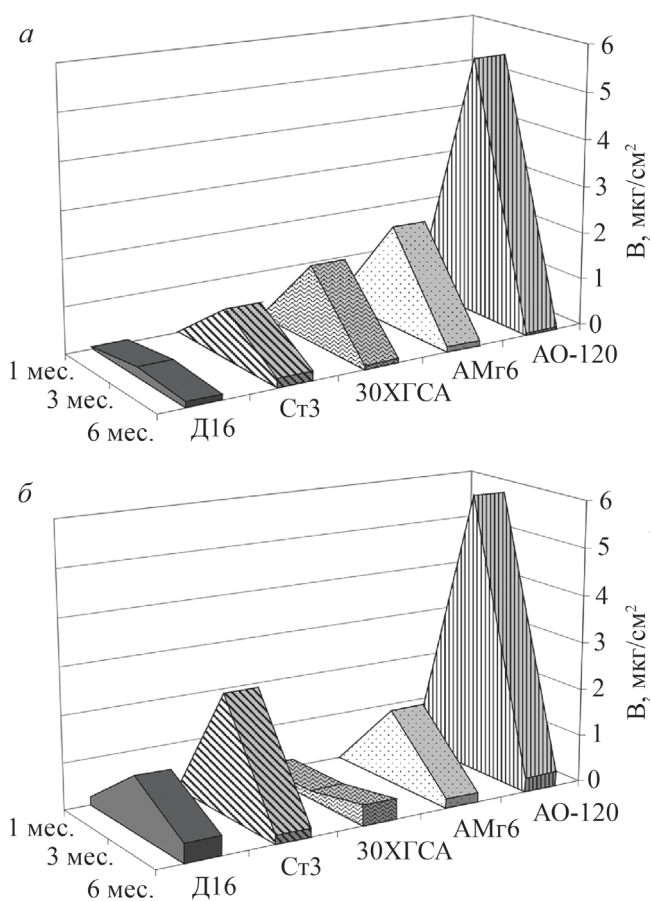
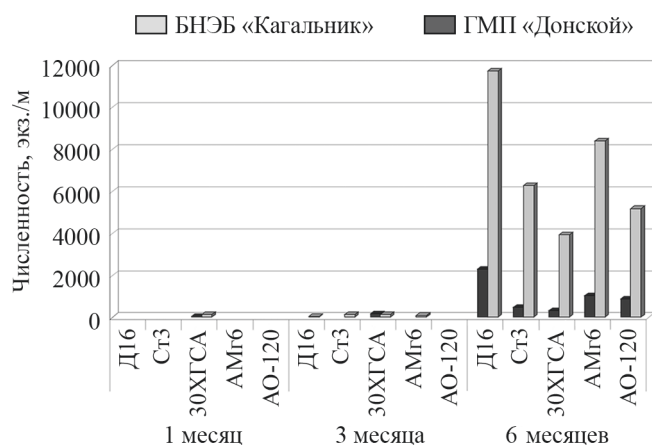


Рис. 3. Изменение суммарной биомассы микроводорослей (B, мкг/см<sup>2</sup>) на экспериментальных пластинах: а – БНЭБ «Кагальник»; б – ГМП «Донской».

Fig. 3. Change in the total biomass of microalgae (B, µg/cm<sup>2</sup>) on experimental plates: а – Coastal Scientific Expedition Base “Kagal’nik”; б – gauging station “Donskoy”.

образцах Д16, а на ГМП «Донской» – на образцах 30XGSA.

В июне 2019 г. на пластинах, экспонированных в водоеме в течение 6 месяцев, на обеих станциях было отмечено резкое снижение численности (до 26–145 кл./см<sup>2</sup>) и биомассы (до 0,05–0,43 мкг/см<sup>2</sup>) перифитона, при этом доминирование сохранялось за диатомовыми водорослями. Число видов на пластинах варьировало в том же диапазоне: от 23 до 33 видов. Видовой список был пополнен такими планктонными водорослями из отдела Chlophyta, как виды родов *Coelastrum* Nägeli, 1849, *Monoraphidium* Komárková-Legnerová, 1969, *Scenedesmus* Meyen, 1829, а также представителями Cyanoprokaryota: *Microcystis*, *Planktothrix* Anagnostidis & Komárek, 1988, *Oscillatoria*. Как и после трех месяцев экспонирования, после шести месяцев наименьшая скорость и интенсивность об-растания водорослями на БНЭБ «Кагальник» отме-



**Рис. 4.** Численность макрозообентоса на экспериментальных пластинах через 1, 3, 6 месяцев экспозиции (в пересчете на 1 м<sup>2</sup>).

**Fig. 4.** The density of macrozoobenthos on experimental plates after 1, 3, 6 months of exposure (in terms on 1 m<sup>2</sup>)

чена на образцах Д16, а на ГМП «Донской» – на образцах 30ХГСА.

Таким образом, несмотря на то, что начало эксперимента пришлось на холодное время года (зимний – ранневесенний периоды), на пластинах после одного месяца экспозиции было отмечено начало колонизации субстрата микрофитоперифитом и его бурное развитие в течение трех месяцев экспозиции. По истечении шести месяцев экспозиции выявлено изменение таксономического состава фитоперифитонного сообщества и резкий спад его количественных показателей, которые связаны не только с сезонной сукцессией, но и с ростом численности макробеспозвоночных-фитофагов, заселяющих экспериментальные пластины.

Макрообрастания. Структура сообществ обрастаний определяется наличием потенциальных организмов-обрастателей в бентосе окружающей акватории, поэтому необходимо исследовать не только оброст, но и макрозообентос с целью прогнозирования образования и развития этих сообществ.

По многолетним наблюдениям Е.М. Парталы [10], в Азовском море на субстрате, выставленном в водоем в зимний, ранневесенний и позднесенний периоды, оброст состоит из бактерий и водорослей, преимущественно диатомовых, макрообрастания отсутствуют. По завершении месячного экспонирования на пластинах на станции 1 отмечено 2 таксона макрозообентоса (*Pontogammarus (Obesogammarus) crassus* (G.O. Sars, 1894), *Chironomus cf. plumosus*), на станции 2 – 1 таксон (*C. plumosus*).

Через 3 месяца экспозиции донные беспозвоночные на БНЭБ «Кагальник» наблюдались только на пластине 30ХГСА, среди них обнаружены единичные особи двустворчатого моллюска, фильтратора-сестонофага *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), формирующего богатые по биомассе друзовые сообщества в дельте Дона и кутовой части Таганрогского залива, а также нематоды отряда Enoplida и *P. crassus* (рис. 4).

На станции ГМП «Донской» организмы макрозообентоса зарегистрированы на всех пластинах, за исключением изготовленных из органического стекла (рис. 4). Число таксонов на пластинах колебалось от 1 до 4, всего зарегистрировано 5 таксонов (Enoplida, *Tubifex tubifex* (O.F. Müller, 1774), *Pontogammarus crassus*, *Chironomus cf. plumosus*, *Hydrobia acuta* (Draparnaud, 1805)). На пластине Д16 также отмечены единичные особи *Dreissena polymorpha*.

Через 6 месяцев экспозиции отмечен резкий скачок численности макробеспозвоночных (рис. 4, табл. 1). Численность макробеспозвоночных на пластинах, экспонируемых у ГМП «Донской» в 5–12 раз превосходила численность на аналогичных пластинах, экспонируемых на БНЭБ «Кагальник». На всех пластинах зарегистрированы обрастания, сформированные *Fredericella sultana* (Blumenbach, 1779) (Bryozoa: Phylactolaemata), на ряде пластин отмечены гидроиды *Cordylophora caspia* (Pallas, 1771) (Hydrozoa: Cnidaria). В боль-

**Таблица 1.** Изменения основных количественных характеристик через 1, 3 и 6 месяцев экспозиции  
**Table 1.** Changes in the main quantitative characteristics after 1, 3 and 6 months of exposure

| Период экспозиции<br>Exposure period | Количество видов по станциям<br>Number of taxa at stations |                        | Численность по станциям (экз./м <sup>2</sup> )<br>Density at stations (ind./m <sup>2</sup> ) |                        |
|--------------------------------------|--|------------------------|--|------------------------|
|                                      | «Кагальник»<br>“Kagal’nik”                                 | «Донской»<br>“Donskoy” | «Кагальник»<br>“Kagal’nik”   | «Донской»<br>“Donskoy” |
| 1 месяц / 1 month                    | 0–2  | 0–1                    | 0–44   | 0–133                  |
| 3 месяца / 3 months                  | 3  | 1–4                    | 0–178  | 0–133                  |
| 6 месяцев / 6 months                 | 4–7  | 4–10                   | 310–2304   | 3943–11740             |



**Таблица 2.** Результаты измерений твердости по Виккерсу образцов сталей и алюминиевых сплавов в исходном состоянии и после трех месяцев экспозиции**Table 2.** The Vickers hardness test results for steel and aluminum alloy samples in the initial state and after 3 months of exposure

| Условия экспозиции<br>Exposure conditions   | 30ХГСА, HV<br>30HGSA, HV | Ст3, HV<br>St3, HV | Д16, HV<br>D16, HV | АМг6, HV<br>AMg6, HV |
|---|--------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Исходные значения / Initial values  | 199,75                   | 150,00             | 140,75             | 91,00                |
| Значения после трех месяцев экспозиции<br>Values after 3 months of exposure         |                          |                    |                    |                      |
| «Донской», атмосферный стенд<br>“Donskoу”, open atmospheric test benches            | 167,50                   | 137,75             | 137,75             | 90,00                |
| «Донской», испытания образцов в воде<br>“Donskoу”, test bench for water samples     | 186,25                   | 137,50             | 137,25             | 89,25                |
| «Кагальник», атмосферный стенд<br>“Kagal’nik”, open atmospheric test benches        | 165,50                   | 137,75             | 137,00             | 90,00                |
| «Кагальник», испытания образцов в воде<br>“Kagal’nik”, test bench for water samples | 186,75                   | 137,25             | 137,50             | 89,5                 |

шом количестве на пластинах присутствовали моллюски *Dreissena polymorpha* и ракообразные *Corophium volutator* (Pallas, 1766), формирующие специфические корофидные илы в дельте Дона. Проективное покрытие обрастателей составляет от 15 до 100 % (максимум отмечен на пластине из сплава Д16 на ГМП «Донской») (табл. 1).

После 6 месяцев на БНЭБ «Кагальник» выявлено 8 таксонов: *Fredericella sultana*, *Cordylophora caspia*, *Tubifex tubifex*, *Viviparus viviparus* (Linnaeus, 1758), *Dreissena polymorpha*, *Pontogammarus crassus*, *Corophium volutator*, *Chironomus* cf. *plumosus*. На ГМП «Донской» выявлено 11 таксонов: *F. sultana*, *C. caspia*, *T. tubifex*, *Piscicola geometra* (Linnaeus, 1761), *Caspiobdella caspica* (Selensky, 1915), *Hydrobia acuta*, *V. viviparus*, *D. polymorpha*, *P. crassus*, *C. volutator*, *Ch.* cf. *plumosus*.

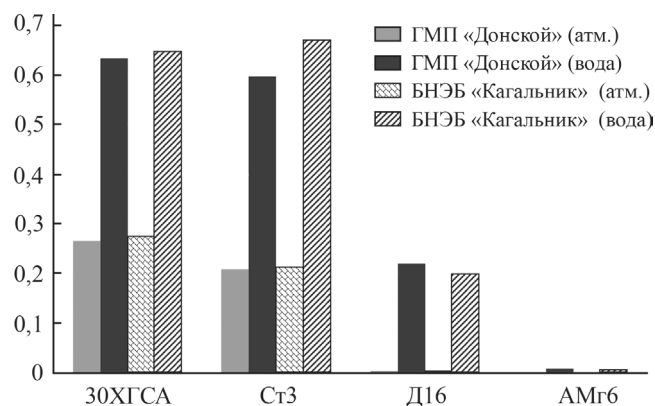
В ходе изучения формирования сообществ обрастания на искусственном субстрате отмечено, что экспериментальные пластины заселялись массовыми видами макрозообентоса. Нематоды отряда Euproliida, зафиксированные на пластинах, в пробах макрозообентоса не отмечены, но в мейобентосе являются довольно обычными. Низкое таксономическое разнообразие оброста через 1 и 3 месяца экспонирования можно объяснить как начальной стадией сукцессии, так и тем, что эксперимент был поставлен зимой. В Северном полушарии наименьшая скорость развития эпибиозов обрастателей отмечена в зимний период [15].

**Оценка коррозионной стойкости металлических пластин под воздействием гидрометеорологических и биологических процессов.** В работе представлены результаты мониторинга коррозионной прочности металлических пластин под

влиянием гидрометеорологических и биотических факторов после трех месяцев экспозиции (с 20 декабря 2018 г. по 20 марта 2019 г.). Климатические испытания коррозионной стойкости материалов в естественной среде на стационарах ЮНЦ РАН продолжают.

При оценке изменения твердости образцов металлических материалов выявлено наибольшее снижение данного показателя для образцов стали 30ХГСА – 17 % при испытаниях на атмосферном стенде, при испытаниях в воде снижение показателя составило 6,5 % независимо от станции экспонирования. Снижение твердости поверхности образцов стали Ст3, сплава Д16 и сплава АМг6 составило 8, 2,3 и 1 % соответственно при испытаниях во всех условиях (табл. 2).

Для стали 30ХГСА после 3 месяцев экспозиции наибольшая скорость коррозии отмечалась при экс-

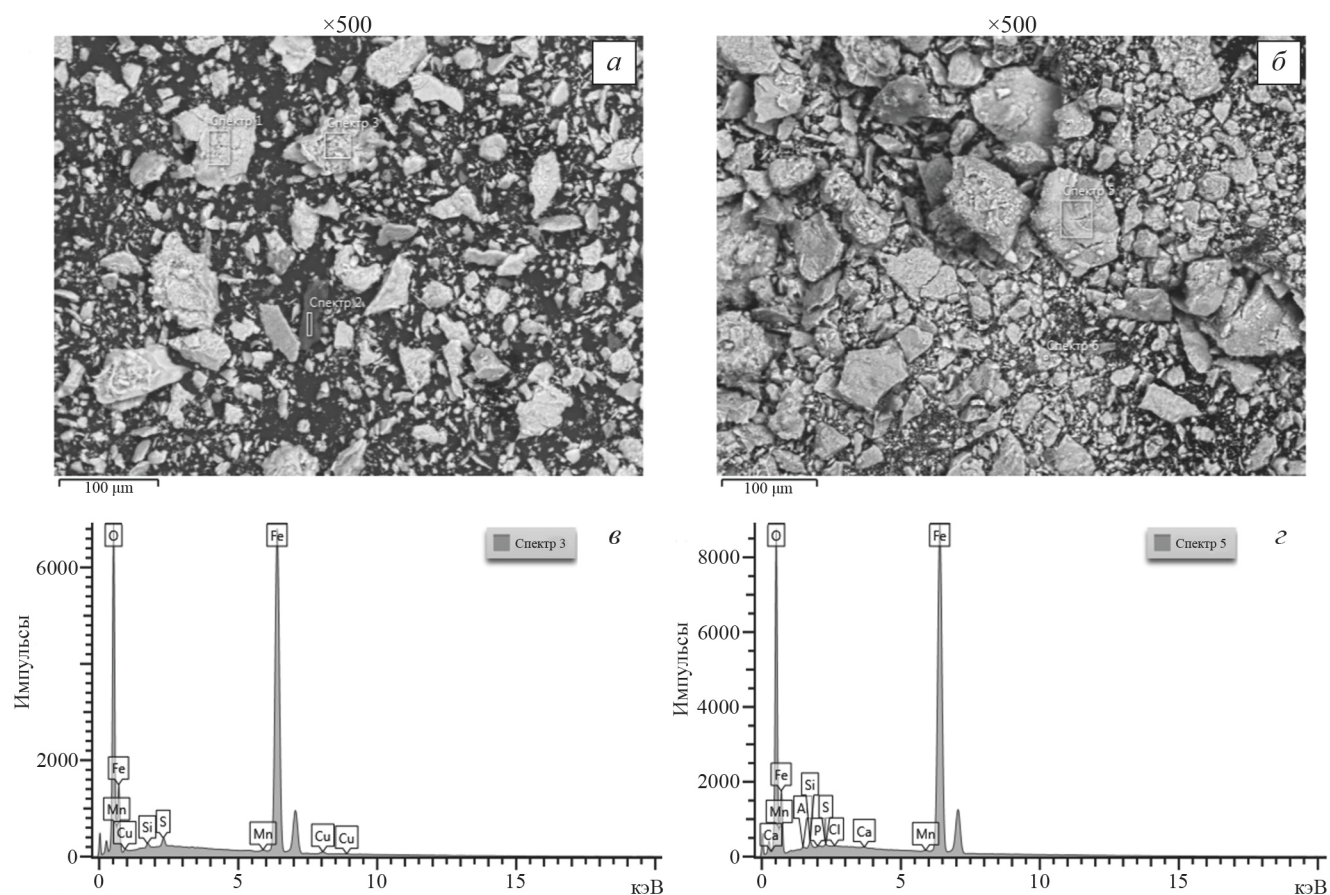
**Рис. 5.** Скорость коррозии образцов металлических материалов после 3 месяцев испытаний в воде и на атмосферных стендах.**Fig. 5.** The corrosion rate of samples of metallic materials after 3 months of testing in water and at atmospheric stands.

понировании образцов в воде на БНЭБ «Кагальник» и ГМП «Донской» и составляла 0,6469 и 0,6346 г/м<sup>2</sup> в сутки (рис. 5). Такой результат в 2,4 раза больше, чем для образцов, проходивших экспозицию на атмосферных стендах. Для стали Ст3 наибольшую скорость коррозии вызывает выдержка образцов в воде на обоих стационарах. На ГМП «Донской» ее показатель максимальный и составляет 0,6716 г/м<sup>2</sup> в сутки. Скорость коррозии алюминиевого сплава Д16 при испытаниях в воде выше по сравнению с АМг6 в 44 и 35 раз на БНЭБ «Кагальник» и ГМП «Донской» соответственно. В воздухе скорость коррозии при испытаниях на атмосферном стенде сплава Д16 превышает скорость коррозии АМг6 в 2,8 и 2,3 раза на БНЭБ «Кагальник» и ГМП «Донской» соответственно.

После трех месяцев экспозиции в составе продуктов коррозии образцов сталей Ст3 и 30ХГСА, экспонируемых на БНЭБ «Кагальник» и ГМП «Донской», обнаружены продукты окисления же-

леза, о чем свидетельствуют пики железа и кислорода (рис. 6). Дополнительно выявлены элементы коррозионно-активной среды – сера и хлор, а также натрий, калий и кальций, входящие в состав солей. Отмечено, что содержание коррозионно-активных элементов – серы и хлора – на образцах, экспонируемых в воде, больше, чем на образцах, экспонируемых на атмосферном стенде.

В составе продуктов коррозии образцов стали 30ХГСА, экспонируемых в воде на ГМП «Кагальник», на поверхности помимо продуктов окисления железа, элементов коррозионной среды и солей кальция обнаружены частицы на основе кремния, алюминия и кислорода, локально обнаружен фосфор (рис. 7а, в). В составе продуктов коррозии, снятых с образцов после трехмесячной экспозиции на ГМП «Донской», также обнаружены частицы губчатой формы, содержащие кремний и кислород (рис. 7б, г), расположенные скоплениями на волонистых объектах на углеродной основе, за счет



**Рис. 6.** Анализ состава продуктов коррозии образца стали Ст3 после 3 месяцев экспозиции на БНЭБ «Кагальник» (*а* – микроструктура, *в* – локальный химический состав) и ГМП «Донской» (*б* – микроструктура, *г* – локальный химический состав).

**Fig. 6.** Analysis of the composition of corrosion products of a steel sample St3 after 3 months of exposure on Coastal Scientific Expedition Base “Kagalnik” (*a* – microstructure, *v* – local chemical composition) and gauging station “Donskoy” (*b* – microstructure, *z* – local chemical composition).

формирования дополнительного слоя водорослей и микроорганизмов.

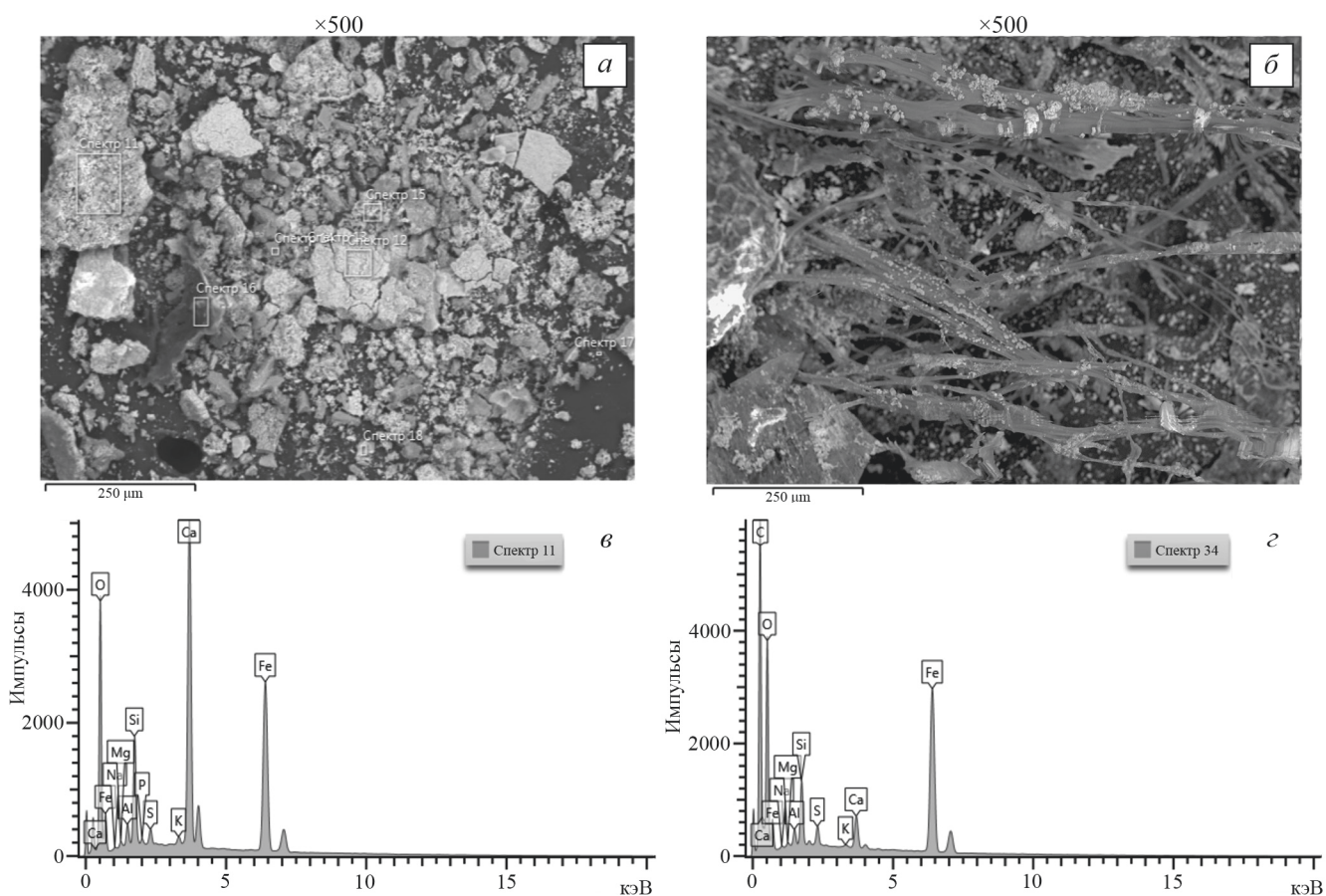
Проведены металлографические исследования с оценкой глубины межкристаллитной и питтинговой коррозии образцов алюминиевых сплавов Д16 и АМг6, а также сталей Ст3 и 30ХГСА. По результатам оценки внешнего вида поверхности образцов сплава Д16 наибольшая площадь коррозионных поражений (до 30 %) выявлена на образцах, экспонировавшихся на БНЭБ «Кагальник» в воде.

Установлено, что после трех месяцев экспозиции на БНЭБ «Кагальник» и ГМП «Донской» в воде глубина межкристаллитной коррозии образцов сплава Д16 составила 0,7 и 0,941 мм соответственно, глубина питтинговой коррозии – 0,767 и 0,826 мм соответственно. На образцах сплава АМг6 коррозионные поражения и, соответственно, межкристаллитная коррозия не были выявлены после испытаний на обеих станциях. Оценка внешнего вида поверхности стальных образцов марок Ст3 и

30ХГСА показала, что наибольшая площадь коррозионных поражений (100 %) присутствует на образцах, экспонировавшихся на БНЭБ «Кагальник» и ГМП «Донской» на атмосферных стендах. По результатам металлографических исследований установлено, что наибольшая глубина коррозии характерна для образцов стали 30ХГСА, экспонировавшихся в воде на ГМП «Донской», она составляет 0,135 мм, что в 2,8 раза выше аналогичного показателя для образца марки Ст3.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили сделать ряд выводов. Наибольшее видовое разнообразие перифитонного сообщества отмечено в весенний сезон. Летом происходит постепенная деградация ценоза, с учетом нестабильных термохалинных условий среды наиболее приспособленными оказываются водоросли, выдерживающие периодиче-



**Рис. 7.** Анализ состава продуктов коррозии образца стали 30ХГСА после 3 месяцев экспозиции на БНЭБ «Кагальник» (*а* – микроструктура, *б* – локальный химический состав) и ГМП «Донской» (*б* – микроструктура, *з* – локальный химический состав).

**Fig. 7.** Analysis of the composition of corrosion products of a sample of steel 30HGSA after 3 months of exposure on Coastal Scientific Expedition Base “Kagalnik” (*a* – microstructure, *б* – local chemical composition) and gauging station “Donskoy” (*б* – microstructure, *з* – local chemical composition).

ские колебания солености. Для понимания степени агрессивного воздействия эстуарной среды на металлические пластины в условиях экстремальных наводнений и осушений авандельты следует учесть, что в пик наводнения (низовки) уровень солености может подняться до 5,6–6,0 ‰. Отток воды в Азовское море и снижение солености происходят не сразу, процесс распреснения (до 0,5 ‰) растягивается на несколько суток. Необходимо обратить внимание на временной сдвиг между пиками хода уровня воды и солености – до четырех часов между первыми максимумами наводнения и до двух часов между вторыми максимумами. Волнообразный характер роста и спада уровня воды и солености связан с сейшевой природой стонно-нагонных явлений Азовского моря [16], а сдвиг объясняется продвижением нагонных соленых вод вверх по руслу после ослабления подпора речных вод [17].

Большинство видов-обрастателей в своем развитии проходит стадию пелагической личинки. Для более полного понимания особенностей их жизненного цикла стендовые испытания будут дополнены изучением сезонной динамики оседания на пластины (вторая серия экспериментов, результаты в настоящее время находятся в стадии камеральной обработки).

В дальнейшем, учитывая сезонный характер, агрессивность водной среды и биоты по отношению к металлам, необходимо проводить исследования по следующим направлениям: 1) оседание на экспериментальные пластины икры промысловых рыб; 2) цветение воды и заморные явления; 3) гнездование колониальных околоводных птиц и т.д.; 4) потенциально токсичные цианопрокариоты, регулярно развивающиеся в кутовой части Таганрогского залива и в авандельте (*Dolichospermum flosaquae* (Brébisson ex Bornet & Flahault) Wacklin, Hoffmann & Komárek, *Anabaenopsis knipowitschii* (Usachev) Komárek, *Aphanizomenon flosaquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Nodularia spumigena* Mertens ex Bornet & Flahault) в связи с периодическим повышением солености воды; 5) осушение (в связи с маловодьем) экспериментальных пластин, установленных на глубине 2 м, которые в течение многих суток подвергались атмосферному воздействию и влиянию отрицательных температур.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2017. Причины осолонения Таганрогского залива. *Доклады Академии наук*. 477(1): 92–96. doi: 10.7868/S086956521731019X
2. Матишов Г.Г., Ковалева Г.В., Ясакова О.Н. 2016. Аномальное осолонение в Таганрогском эстуарии и дельте Дона. *Наука Юга России*. 12(1): 43–50.
3. Минеев В.Г. 2004. *Агрохимия*. М., изд-во МГУ: 720 с.
4. Сидоренко А.И., Слюхин В.Д. 2016. Гнездование большого баклана (*Phalacrocorax carbo*) на техногенных сооружениях в Украине. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія*. 24(2): 308–316.
5. Миноранский В.А., Даньков В.И., Тихонов А.В. 2017. Большой баклан (*Phalacrocorax carbo* L.) в дельте Дона и связанные с ним проблемы. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 1: 67–72.
6. Лебедев Е.М. 1959. О способе сбора количественного материала по обрастанию судов. В кн.: *Труды Всесоюзного гидробиологического общества*. Т. 9. М., Изд-во Академии наук СССР: 367–369.
7. Зевина Г.Б. 1961. Обрастание гидрохимических сооружений на Каспийском море. В кн.: *Труды Института океанологии АН СССР*. Т. 49. М., Изд-во Академии наук СССР: 65–96.
8. Горин А.Н. 1975. Обрастания гидротехнических сооружений портов северо-западной части Японского моря. В кн.: *Обрастания в Японском и Охотском морях*. Владивосток, изд-во ДВНЦ АН СССР: 14–20.
9. Денисенко Н.В. 1990. *Распределение и экология мианок Баренцева моря*. Апатиты, изд-во КНЦ АН СССР: 157 с.
10. Парталы Е.М. 2013. Обрастание как индикатор изменений в экосистеме Азовского моря. *Сборник научных трудов SWorld*. 49(4): 33–35.
11. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений*. 1983. Л., Гидрометеониздат: 239 с.
12. 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
13. 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
14. Сорокина В.В., Бердников С.В. 2018. Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря. *Водные ресурсы*. 45(6): 670–684. doi: 10.1134/S0321059618060147
15. Звягинцев А.Ю. 2005. *Морское обрастание в северо-западной части Тихого океана*. Владивосток, Дальнаука: 432 с.
16. Матишов Г.Г., Инжебеikin Ю.И. 2009. Численные исследования сейшевых колебаний уровня Азовского моря. *Океанология*. 49(4): 485–493.

17. Соловьев А.Н., Хартиев С.М., Клещенко А.В., Григоренко К.С., Соловьева А.А. 2015. О связи волновых процессов планетарного масштаба Азовского и Черного морей. В кн.: *Сборник научных трудов международной научно-методической конференции, посвященной 85-летию ДГТУ. «Инновационные технологии в науке и образовании «ИТНО-2015»» (Ростов-на-Дону – пос. Дивноморское, 7–10 сентября 2015)*. Ростов н/Д – Зерноград, изд-во СКНИИМЭСХ: 256–259.
9. Denisenko N.V. 1990. *Raspreделение i ekologiya mshanok Barentseva morya*. [Distribution and ecology of bryozoans of the Barents Sea]. Apatity, Kola Science Center of the USSR Academy of Sciences: 157 p. (In Russian).
10. Partaly E.M. 2013. [Fouling as an indicator of changes in the ecosystem of the Sea of Azov]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld*. 49(4): 33–35. (In Russian).
11. *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).
12. 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
13. 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
14. Sorokina V.V., Berdnikov S.V. 2018. Nutrient loading of the Don and Kuban on the ecosystem of the Sea of Azov. *Water Resources*. 45(6): 920–934. doi: 10.1134/S0097807818060143
15. Zvyagintsev A.Yu. 2005. *Morskoe obrastanie v severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana*. [Marine Fouling in the Northwest Pacific]. Vladivostok, Dalnauka: 432 p. (In Russian).
16. Matishov G.G., Inzhebeikin Yu.I. 2009. Numerical study of the Azov Sea level seiche oscillations. *Oceanology*. 49(4): 445–452. doi: 10.1134/S0001437009040018
17. Solov'ev A.N., Khartiev S.M., Kleshchenkov A.V., Grigorenko K.S., Solov'eva A.A. 2015. [On the connection of wave processes of a planetary scale of the Azov and Black seas]. In: *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu DGTU. "Innovatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii "ITNO-2015"». [Collection of scientific papers of the international scientific-methodological conference dedicated to the 85<sup>th</sup> anniversary of Don State Technical University. "Innovative technologies in science and education ITNO-2015" (Rostov-on-Don, Divnomorskoye, Russia, 7–10 September 2015)]*. Rostov-on-Don – Zernograd, North Caucasus Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture: 256–259. (In Russian).

## REFERENCES

Поступила 31.03.2020