

ют найденную масштабную зависимость [3, 5, 6] доступной скорости плавания от линейного размера биологического объекта.

Таким образом, метод микрокинематографии позволил исследовать движитель планктонной личинки морской звезды *Patiria pectinifera*, который относится к меромириокопальному типу. Динамические параметры локомоторного движения личинки звезды определяются величиной скорости поступательного ($V=2,4$ мм/с) и вращательного движения ($V=0,12$ об/с). Установленная скорость плавания личинки морской звезды оказалась на порядок выше скорости плавания жгутиковых планктонных водорослей; относительная скорость плавания личинки ($6,5$ длин/с), напротив, меньше, чем у жгутиковых водорослей (10 длин/с).

1. Алев М. Ю. Зависимость физиологической активности жгутиковых планктонных водорослей от температуры среды // IV Всесоюз. науч.-техн. конф. «Вклад молодых ученых и специалистов в решение современных проблем океанологии и гидробиологии»: Тез. докл. (Севастополь, 1989). — Севастополь, 1989. — С. 6—7.
2. Алев М. Ю. Зависимость скорости плавания жгутиковых планктонных водорослей от их линейных размеров // Материалы Всесоюз. конф. мол. ученых «Актуальные вопросы водной экологии» (Севастополь, 22—24 нояб. 1989). — Киев: Укргипроводхоз, 1990. — С. 3—4.
3. Алев Ю. Г. Экоморфология. — Киев: Наук. думка, 1986. — 424 с.
4. Иванова-Казас О. М. Сравнительная эмбриология беспозвоночных животных. Иглокожные и полухордовые. — М.: Наука, 1978. — 166 с.
5. Шмидт-Нильсен К. Размеры животных: почему они так важны? — М.: Мир, 1987. — 260 с.
6. Шулейкин В. В. Физика моря. — М.: Наука, 1968. — 1083 с.
7. Юшин В. В., Незлин Л. П. Ультраструктура ресничного шнура эхиноплутеуса — планктонной личинки морского ежа *Echinocardium cordatum* // Цитология. — 1990. — 32, № 5. — С. 469—473.

Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского
АН Украины, Севастополь

Получено
04.01.91

L. V. BONDARENKO, M. Yu. ALEYEV
**THE SWIMMING OF PLANCTONIC LARVAE
OF PATIRIA PECTINIFERA STARFISH**

Summary

The swimming of planctonic larvae of *Patiria pectinifera* starfish was studied by means of „Contact“, the original microcinematographic system. The quantitative correlation of propulsive and rotatory movement of a larva was investigated and the velocity of propulsive movement was determined to equal 2.4 mm/s.

УДК 579:551.46.09 628.5

Л. А. ГУБАСАРЯН, А. А. ЛЕБЕДЬ

**УЧАСТИЕ МОРСКОЙ МИКРОФЛОРЫ В КОРРОЗИИ
ВНУТРЕННИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМОВ**

В замкнутых металлических емкостях, заполненных на две трети морской водой, одна из которых покрыта ингибирующим покрытием на основе нефтепродуктов, показано, что состав и развитие изучаемых групп микроорганизмов имеют специфические для данных условий закономерности. Выявлены колебания величин сульфатредуцирующих и тионовых микроорганизмов, принимающих участие в процессах корро-

© Л. А. Губасарян, А. А. Лебедь, 1992

зии. Отмечено общее увеличение численности этих групп микроорганизмов. Снижение рН и окислительно-восстановительного потенциала среды усиливает коррозию стали 10ХСНД.

Условия эксплуатации подвергающихся коррозии металлоконструкций отличаются большим разнообразием. В этой связи механизм участия микрофлоры и степень ее влияния на коррозию металлов зависит от экологической обстановки, складывающейся в окружающей среде. Одной из причин интенсификации коррозии металлов является повышение агрессивности среды в результате жизнедеятельности микроорганизмов. В литературе имеются сведения о влиянии микроорганизмов первичной пленки обрастания на коррозию некоторых марок сталей, используемых в судостроении [1—3]. Но все они посвящены изучению биокоррозии металлов в открытых морских акваториях, где продукты жизнедеятельности микроорганизмов рассеиваются (удаляются от поверхности металла) в результате постоянного перемешивания и неограниченности водных масс. Данные о влиянии микроорганизмов на коррозию внутренних металлических поверхностей замкнутых объемов отсутствуют, хотя выяснено, что коррозионные разрушения (например, металлических поверхностей балластных отсеков судов, доков) отличаются особой интенсивностью, а экологическая обстановка характеризуется отсутствием света, недостатком кислорода, длительными периодами нахождения воды в балласте. Можно предположить, что в ограниченном объеме воды, необновляемой в течение нескольких месяцев, развивается своеобразный биоценоз, а накопление метаболитов в процессе развития сообщества создает острую коррозионно опасную ситуацию. Цель наших исследований — изучение качественного и количественного состава микрофлоры, принимающей прямое или косвенное участие в коррозии балластных цистерн, в зависимости от времени выдержки воды в цистернах и наличия защитного противокоррозионного покрытия. Изучена также связь между динамикой развития сообщества микроорганизмов и скоростью коррозии металлических образцов.

Материал и методы. Исследования проводили в металлических емкостях, имитирующих условия эксплуатации балластных отсеков. Размеры выполненных из корпусной стали 10ХСНД емкостей 600×600×600 мм. Их заполняли на 2/3 объема морской водой из Севастопольской бухты. Наличие герметично закрепляемых крышек обеспечивало близость к условиям эксплуатации. В опыт были взяты две емкости: без покрытия и с защитным покрытием на основе нефтепродуктов. В каждую емкость помещали в подвешенном состоянии при полном погружении в воду отшлифованные обезжиренные образцы, выполненные из той же марки стали. Во второй емкости образцы были окрашены тем же защитным составом. Размеры образцов 100×50×3 мм.

Исследования динамики численности микроорганизмов проводили как в пробах воды из емкостей, так и в смывах с поверхности экспонируемых металлических образцов. В экспериментах изучали четыре группы микроорганизмов: гетеротрофные, тионовые, сульфатредуцирующие и денитрификаторы, известные как коррозионно опасная микрофлора. Учитывали, что гетеротрофные и тионовые бактерии являются аэробной микрофлорой, а сульфатредуцирующие и денитрифицирующие — анаэробной. Для исследования отбирали придонный слой воды из баков, а с пластин делали смыв стерильным тампоном с площади 250 мм². Затем тампон тщательно взбалтывали в 30 мл физиологического раствора. В дальнейшем из воды и смывов готовили серию предельных десятикратных разведений в физрастворе. Количество микроорганизмов определяли посевом 1 мл инокулята из каждого разведения на элективные среды. Соответствующее разведение на каждую среду высевалось в трех повторностях.

Гетеротрофные микроорганизмы выращивали на жидкой среде с пептоном (1 л морской воды + 10 г пептона). Общую численность тио-

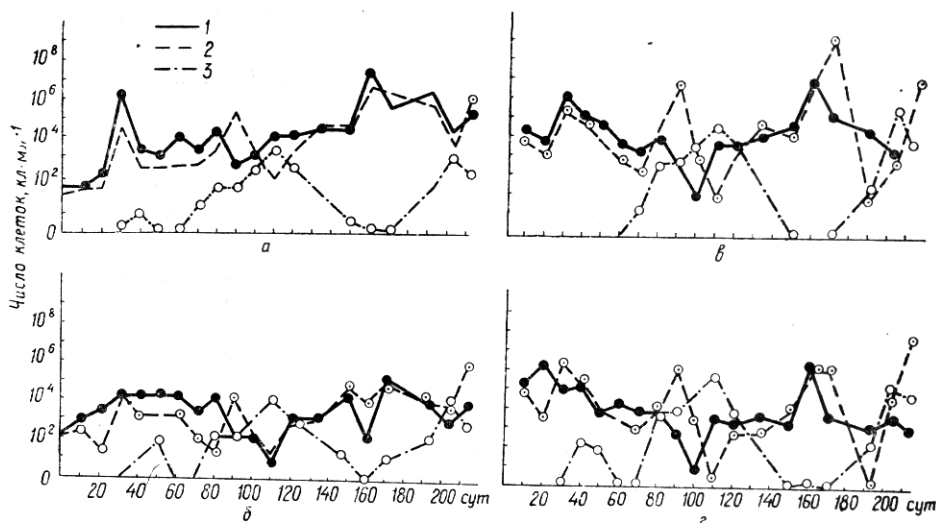


Рис. 1. Численность микроорганизмов в воде окрашенной (а) и неокрашенной (б) емкостей, на окрашенных (в) и неокрашенных (г) пластинах:
1 — гетеротрофы; 2 — тионовые; 3 — сульфатредукторы

новых бактерий определяли на среде Сорокина [6]. Биоценоз сульфатредукторов и денитрификаторов изучали на средах Постгейта и Гильтая [5]. Одновременно с отбором пробы воды проводили замеры pH и Eh, используя универсальный ионметр ЭВ-74. Скорость коррозии определяли массовым методом и рассчитывали по формуле $K = (P_1 - P_2) / (S \cdot t \cdot 10^{-3})$, где K — скорость коррозии, г/м² ч (затем переводили в мм/год); $P_1 - P_2$ — разность масс, г; S — площадь образца, м²; t — время, ч. На протяжении всего эксперимента проводили наблюдение за состоянием металлических поверхностей внутри емкостей, отмечали появление первых продуктов коррозии и их изменение.

Результаты исследований. Визуально в неокрашенной емкости коррозионные процессы протекали более интенсивно, продукты коррозии появились уже на третьи сутки, а первые признаки образования сульфидов железа (продукты коррозии черного цвета) наблюдались на 30-е сутки, что согласуется с данными микробиологических исследований. В окрашенном баке продукты коррозии появились на 80-е сутки, сульфиды железа визуально не обнаружены.

В емкостях развитие сообщества микроорганизмов в замкнутом объеме выявило свои закономерности. В пробах воды и смывах с пластин в основном отмечены гетеротрофные, тионовые и сульфатредуцирующие микроорганизмы, а появление денитрификаторов оказалось эпизодичным и наблюдалось на 90—100-е сутки эксперимента. Тионовые и гетеротрофные микроорганизмы уже в первые сутки по численности составляли $2,5 \cdot 10^2$ кл. мл⁻¹, сульфатредуцирующие выявлены на 30—60-е сутки (рис. 1).

В течение длительного эксперимента (220 сут) отмечено три максимума численности тионовых бактерий (на 30, 90 и 160—170-е сутки). Их количество в воде из окрашенной емкости составляло соответственно $4,5 \cdot 10^3$; $2,5 \cdot 10^6$ и $2 \cdot 10^7$ кл. мл⁻¹ (рис. 1, а), а в емкости без покрытия — $2,5 \cdot 10^4$; $2,5 \cdot 10^4$ и $2,5 \cdot 10^5$ кл. мл⁻¹ (рис. 1, б). Численность этих микроорганизмов непосредственно на поверхности металлических пластин в обоих вариантах была выше на несколько порядков, чем в воде, и составляла $2,8 \cdot 10^6$; $7,5 \cdot 10^7$ и $1,5 \cdot 10^{10}$ для окрашенных пластин (рис. 1, в), а также $1,3 \cdot 10^6$; $7,5 \cdot 10^5$ и $2,8 \cdot 10^6$ для неокрашенных (рис. 1, г). Во всех исследуемых вариантах наблюдался минимум численности тионовых бактерий на 110-е сутки, когда они насчитывали все-

го $7-2,5 \cdot 10^2$ кл·мл⁻¹ на пластинах (рис. 1, в, г) и $4,5 \cdot 10-7,5 \cdot 10^2$ кл·мл⁻¹ в виде (рис. 1, а, б).

Изменение количества гетеротрофных микроорганизмов носило несколько иной характер. В воде окрашенного бака отмечен резкий скачок на 30-е сутки ($2,5 \cdot 10^7$ кл·мл⁻¹), а затем произошел спад их численности и на протяжении длительного времени их количество составляло 10^5 кл·мл⁻¹ с незначительными колебаниями (см. рис. 1, а). И только на 160-е сутки наблюдался второй максимум численности ($2,5 \times 10^8$ кл·мл⁻¹). В воде неокрашенной емкости резко выраженного максимума не отмечено, численность гетеротрофов к 30-м суткам вышла на плато и составила $2,5 \cdot 10^4$ кл·мл⁻¹, и только после 80-х суток отмечен медленный спад в их количестве: на 110-е сутки они насчитывали всего 10 кл·мл⁻¹. Затем наблюдалось постепенное нарастание их численности ($4,5 \cdot 10^5$ кл·мл⁻¹ — на 170-е сутки) (см. рис. 1, б).

Иная закономерность в изменениях численности гетеротрофных микроорганизмов отмечена на пластинах (рис. 1, в, г). Имеется два максимума (на 30-е и 160-е сутки) и минимум их численности на 100-е сутки. На окрашенных пластинах количество гетеротрофов в среднем было на два порядка выше, чем на неокрашенных. В связи с этим можно предположить, что обильное развитие микроорганизмов на окрашенном металле связано с наличием органических компонентов в покрытии.

Сульфатредуцирующие бактерии регистрировались в эксперименте неодновременно. В воде и на пластинах неокрашенной емкости их численность, начиная с 30-х суток, постепенно увеличивалась и к 110-м суткам составила соответственно $2,5 \cdot 10^4$ и $7,5 \cdot 10^5$ кл·мл⁻¹, а затем вновь начала снижаться (рис. 1, б, г). В окрашенной емкости на пластинах и в воде сульфатредуцирующие бактерии появились практически одновременно (на 70-е сутки), но максимум их приходился также на 110-е сутки ($7,5 \cdot 10^5$ и $2,5 \cdot 10^4$ кл·мл⁻¹ соответственно), затем количество их начало убывать (см. рис. 1, а, в). Полученные результаты выявили колебательный характер в изменении численности изучаемых групп микроорганизмов: в течение шести месяцев развития бактериального ценоза в емкостях отмечено три максимума гетеротрофных и сульфатредуцирующих микроорганизмов. По литературным сведениям [2, 4], развитие сапрофитных и сульфатредуцирующих бактерий в море на металлических пластинах в течение года характеризуется наличием одного максимума численности, что связывают с сезонным содержанием в виде питательных веществ.

По нашим данным, в замкнутых объемах тионовые, гетеротрофные и сульфатредуцирующие бактерии составляют значительную часть биоценоза. Денитрифицирующие микроорганизмы практически отсутствуют. Исследованиями других авторов [1—3] показано, что в пленке обрастания на сталях в море преобладают денитрифицирующие, марганец-окисляющие микроорганизмы, а тионовые обнаруживались через 12 мес, сульфатредуцирующие появлялись в определенный сезон года. Нами также отмечено не только наличие ряда максимумов и минимумов численности микроорганизмов, но и постепенное нарастание их количества: для тионовых бактерий первый максимум составлял $4,5 \cdot 10^5$ кл·мл⁻¹, второй — $2,5 \cdot 10^6$, третий — $2,5 \cdot 10^8$ кл·мл⁻¹ (см. рис. 1, а).

Сопоставляя наши данные с литературными, можно заключить, что в отличие от моря в закрытых водных объемах металлических емкостей состав и развитие сообщества микроорганизмов имеют специфические особенности: доминирование коррозионно опасных групп и колебательный характер в изменении их численности, что, по-видимому, связано с периодическим накоплением метаболитов в воде замкнутых объемов после периода их бурного развития. Например, максимумы численности тионовых бактерий совпадают по времени со снижением pH с 7,46 до 6,8 для окрашенной и с 7,6 до 6,9 для неокрашенной емкости (рис. 2).

Подкисление среды является характерным показателем активной жизнедеятельности этой группы микроорганизмов. В дальнейшем начи-

налось быстрое развитие сульфатредуцирующих бактерий. Максимум в их развитии наблюдался на 100-е сутки и совпадал с резким снижением окислительно-восстановительного потенциала на 200—250 мв соответственно для окрашенной и неокрашенной емкостей. Максимумы и минимумы сульфатредуцирующих и тионовых бактерий находятся в противофазе, что может свидетельствовать о чередо-

вании реакций окисления и восстановления соединений серы микроорганизмами. Это создает для них в замкнутом объеме поочередно оптимальные условия развития. Следует отметить идентичный характер развития исследуемого сообщества микроорганизмов в окрашенной и неокрашенной емкостях. Наличие защитного покрытия вызывает увеличение количества практически всех изучаемых групп микроорганизмов, но не оказывает существенного влияния на закономерности их развития. По-видимому, наблюдаемые микробиологические процессы определяются особенностью экологических условий, имеющих место в замкнутых металлических объемах, в частности наличием определенных групп микроорганизмов в заливаемой воде и длительностью ее нахождения в емкостях.

При изучении коррозии стальных образцов, экспонируемых в баках, обнаружена определенная зависимость между скоростью коррозии и динамикой развития биоценоза микроорганизмов (рис. 6). В неокрашенной емкости наибольшая скорость коррозии наблюдается на 30-е сутки, что, по-видимому, связано с развитием коррозионно опасной группы тионовых микроорганизмов.

В дальнейшем продукты коррозии, вероятно, создают определенный защитный эффект, однако на 60-е сутки наблюдается небольшой максимум, связанный, очевидно, с развитием сульфатредуцирующих бактерий. Последующее уменьшение скорости коррозии можно объяснить образованием сульфидной пленки, экранирующей металл от среды. Для окрашенного металла динамика коррозионных процессов носила более сложный характер. Отмечено снижение скорости коррозии на 30-е сутки, затем временное увеличение на 40—50-е сутки и после периода стабилизации на 130-е сутки вновь наблюдалось ее возрастание. Это может быть связано с последовательными структурными нарушениями ингибированного покрытия и гидрофобного ингибирующего слоя на металле коррозионно-активными метаболитами.

Таким образом, в результате выполненных исследований выявлены колебания численности исследуемых групп микроорганизмов, связанные с накоплением метаболитов в среде. Также отмечено общее нарастание численности тионовых и сульфатредуцирующих бактерий, что может свидетельствовать об участии их в процессах коррозии. Наблюдаемое снижение рН и окислительно-восстановительного потенциала среды, совпадающее

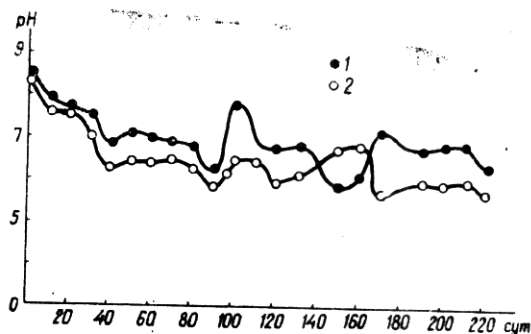


Рис. 2. Изменение величины рН в воде:
1 — окрашенная емкость; 2 — неокрашенная

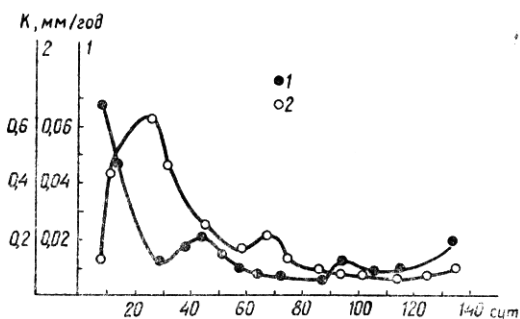


Рис. 3. Зависимость скорости коррозии от продолжительности опыта:
1 — окрашенная емкость; 2 — неокрашенная

по времени с бурным развитием коррозионно опасных групп микроорганизмов, усиливает коррозию стали 10ХСНД. Установлена связь между численностью микроорганизмов и скоростью коррозии стальных образцов.

1. Андреев Е. И., Яновер С. Б., Коптева Ж. П., Матвеев В. М. Микроорганизмы первичной пленки обрастания стали Ст. 3 в условиях моря // Микробиол. журн. — 1981. — 43, № 6. — С. 683—686.
2. Андреев Е. И., Коптева Ж. П., Яновер С. Б. и др. Развитие микроорганизмов на поверхности погруженных в море сталей ст. 09Г2 и ст. 10ХСНД в различные сезоны года // Там же. — 1982. — 44, № 3. — С. 16—19.
3. Андреев Е. И., Яновер С. Б., Коптева Ж. П., Науменко Н. Ф. и др. Микроорганизмы как фактор коррозии стали 45Г17103, эксплуатируемой в условиях морской воды // Там же. — 1985. — 47, № 3. — С. 8—12.
4. Розенберг Л. А. Количественная и качественная характеристика бактериального обрастания металлических пластин // Тр. Ин-та океанологии. — 1963. — 19. — С. 225—230.
5. Ромаренко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. — Л.: Наука, 1974. — 194 с.
6. Сорокин Ю. И. Микрофлора грунтов Черного моря // Микробиология. — 1962. — 31, вып. 5. — С. 899—903.

Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского
АН Украины, Севастополь

Получено 16.11.90

L. A. GURASARYAN, A. A. LEBED

PARTICIPATION OF MARINE MICROFLORA IN CORROSION OF INNER METALLIC SURFACES OF CLOSED RESERVOIRS

Summary

Closed metallic reservoirs with 2/3 their volume filled with marine water (one of reservoirs is covered with an inhibiting coating based on petroleum products) have been used to show that the composition and development of the studied groups of microorganisms differ from microbiocenosis of the open water bodies. Variations of the values of sulphate-reducing and thionic microorganisms participating in corrosion processes are revealed. A total increase in the number of these groups of microorganisms is registered. A decrease in pH and redox potential of the medium intensifies corrosion of steel 10ХСНД.