

УДК 51-7
DOI: 10.7868/S25000640220305

УПРОЩЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССА БИООБРАСТАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТА ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ ФРАГМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

© 2022 г. А.Н. Соколов^{1,2}, Б.В. Чубаренко¹

Аннотация. Фрагменты оплетки габионной сетки – это один из видов пластиковых загрязнителей Мирового океана. Габионы, расположенные вблизи уреза, подвергаются разрушительному волновому воздействию, а фрагменты пластиковой оплетки, имеющие положительную плавучесть, переносятся течениями на значительные расстояния. Траектории движения фрагментов в море зависят от их гидродинамических свойств. Попадая в морскую среду, любое твердое тело подвергается биообрастанию, то есть на поверхности субстрата появляется слой микро-, а затем и макроводорослей. Естественно, появление биопленки приводит к изменению как геометрии, так и плотности объекта, влияя на его гидродинамические характеристики. В работе предложена методика расчета объема биоматериала на фрагменте оплетки в зависимости от времени нахождения в морской среде. Предполагается, что концентрация микроводорослей в воде постоянна, а каждая микроводоросль имеет известный объем. Количество микроводорослей на фрагменте оплетки может увеличиваться как в силу разности скоростей движения микроводорослей и фрагмента, так и в силу обычного экспоненциального роста численности колонии микроорганизмов. Приведено решение системы уравнений для расчета объема биоматериала на модельном объекте – цилиндре конечной длины. По известному объему биоматериала произведен расчет толщины биопленки и эффективного диаметра объекта «фрагмент оплетки + биопленка» в зависимости от времени нахождения в морской среде. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными по биообрастанию в прибрежной зоне Гданьского залива Балтийского моря. Полученные зависимости эффективного диаметра от времени предполагается использовать для последующего моделирования траекторий движения фрагментов оплетки габионной сетки в Балтийском море.

Ключевые слова: пластик, биообрастание, плавучесть, Балтийское море.

SIMPLIFIED REPRESENTATION OF THE BIOFOULING FOR TRANSPORT MODELING OF GEOSYNTHETIC FRAGMENTS IN THE CONDITIONS OF THE BALTIC SEA

A.N. Sokolov^{1,2}, B.V. Chubarenko¹

Abstract. Fragments of a gabion mesh coating are one of the types of plastic pollution in the World Ocean. Gabions located onshore are subjected to destructive wave action, and plastic coating fragments with positive buoyancy are carried by currents over considerable distances. The trajectories of fragments in the sea depend on their hydrodynamic properties. Entering the marine environment, any solid body undergoes biofouling. It means that a layer of micro- and then macro-algae appears on the surface of the substrate. Naturally, the appearance of a biofilm leads to a change of the hydro-physical properties. The paper proposes a method for calculating the volume of biomaterial on a coating fragment depending on the time spent in the marine environment. It is assumed that the concentration of microalgae in water is constant, and each microalgae particle has a known volume. The number of microalgae on a fragment of the coating can increase both

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation), Российская Федерация, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36, e-mail: tengritag@gmail.com, chuboris@mail.ru

² Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation), Российская Федерация, 236041, г. Калининград, ул. Александра Невского, 14

due to the difference in the speeds of movement of microalgae and the fragment, and due to the primitive exponential growth in the number of microorganisms in the colony. The system of equations for finding the volume of biomaterial on a model object – a cylinder of finite length is resolved. Based on the known volume of biomaterial, we can calculate dependencies of the thickness of the biofilm and the effective diameter of the object “coating fragment + biofilm” against the time spent in the marine environment. The modeling results are compared with experimental data on biofouling in the coastal zone of the Gulf of Gdansk of the Baltic Sea. The obtained dependencies of the effective diameter on time are supposed to be used for subsequent modeling of the movement trajectories of the gabion mesh fragments in the Baltic Sea.

Keywords: plastic, biofouling, buoyancy, Baltic Sea.

ВВЕДЕНИЕ

Многие сооружения, применяемые для укрепления склонов и предотвращения оползней, имеют в своей конструкции геосинтетические элементы [1]. К таким сооружениям относятся, в частности, габионы, широко используемые для укрепления морских берегов в Калининградской области (рис. 1а). Габионы представляют собой металлические сетки с пластиковой оболочкой, заполненные достаточно крупными камнями неправильной формы.

Если габионная конструкция оказывается в зоне штормового прилива, она подвергается волновому воздействию. Металлическая сетка, удерживающая камни, постепенно перетирается (рис. 1б). Разрушается и покрывающая сетку защитная пластиковая оболочка – оплетка. Фрагменты оплетки (рис. 1в), обычно имеющие длину несколько сантиметров [2], уносятся штормовыми волнами в море и, в силу положительной плавучести, под действием течений могут переноситься на значительные расстояния, загрязняя окружающую среду.

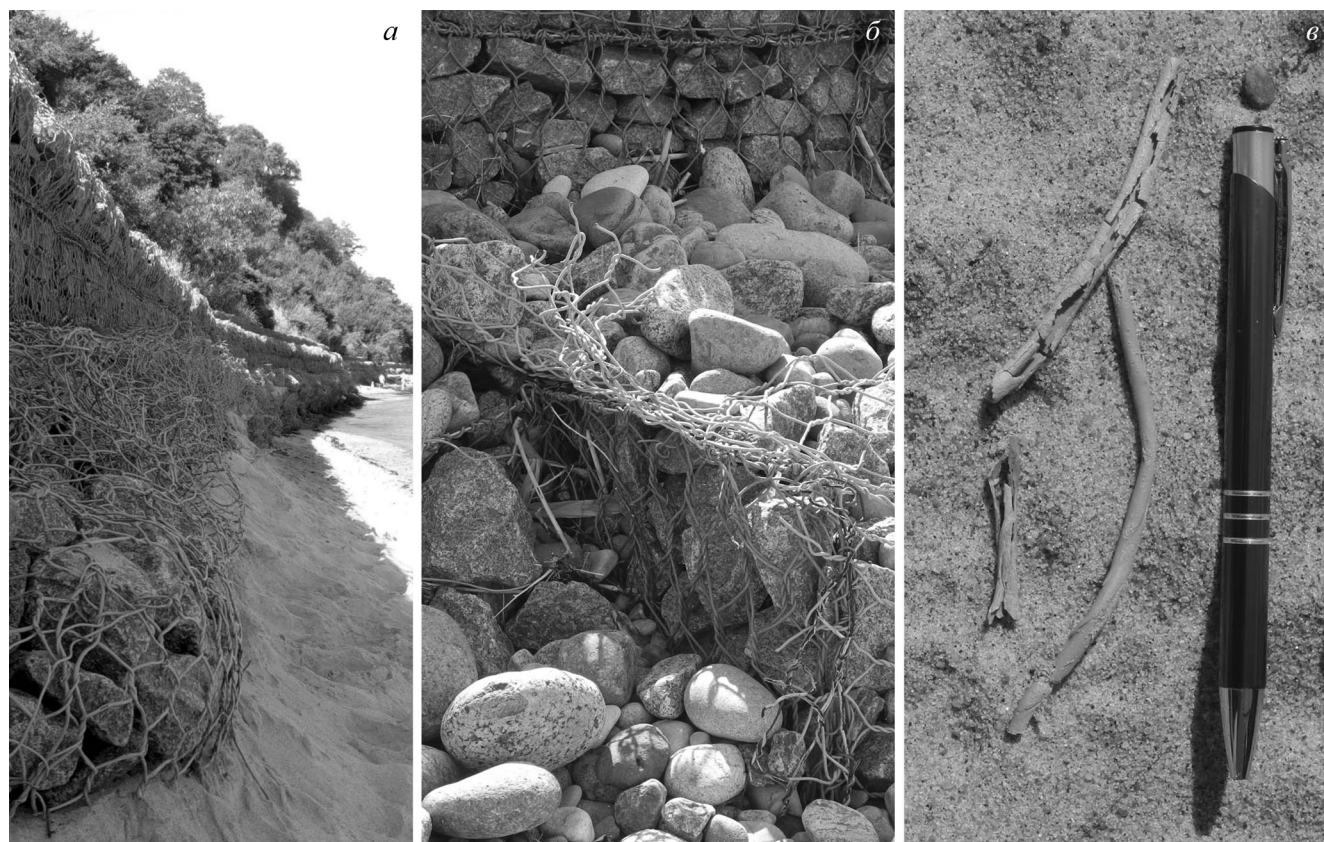


Рис. 1. Габионные конструкции в районе Светлогорска (Калининградская область, Россия): а – общий вид; б – разрушенная габионная ячейка; в – фрагменты оплетки габионной сетки. Фотографии А.Н. Соколова.

Fig. 1. Gabion structures near Svetlogorsk (Kaliningrad Region, Russia): а – general view; б – destroyed gabion cell; в – fragments of gabion mesh coating. Photographs by A.N. Sokolov.

При благоприятных условиях на поверхности любого твердого субстрата после попадания в водную среду появляется биопленка, которая влияет на гидродинамические характеристики обрастающего водорослями объекта. Один из самых известных примеров – это уменьшение скорости движения судов, подводная часть корпуса которых покрыта водорослями. Не являются исключением и фрагменты пластикового мусора, попадающие в морскую среду. Они также подвергаются биообрастанию, что влияет на такие гидродинамические свойства пластиковых фрагментов, как плавучесть, гидродинамическое сопротивление и пр.

Цель данной работы – построить модель, имитирующую обрастание биопленкой фрагмента оплетки габионной сетки, и получить в явном виде зависимость толщины биопленки от времени нахождения фрагмента в водной среде в условиях Балтийского моря. Такая зависимость необходима для проведения гидродинамических расчетов траекторий движения частиц пластика от источников загрязнения на побережье Балтики.

Следует подчеркнуть, что исследование биологических процессов было не самоцелью, а попыткой оценить их влияние на траектории движения пластиковых фрагментов берегозащитных сооружений в Балтийском море. В связи с этим нужна была более-менее адекватная, но в то же время максимально простая модель, позволяющая выполнить соответствующие расчеты транспорта обросших частиц.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Модельный объект. Слой биообрастания возникает не только снаружи, но и внутри цилиндрического объекта, если он, как и оплетка габионной сетки, имеет трубчатую форму. Однако с точки зрения эффектов плавучести вместо тонкостенного трубчатого объекта с рваными стенками (рис. 1*в*), обрастающего по всей поверхности, допустимо рассматривать первоначально сплошной цилиндрический пластиковый объект, обрастающий снаружи. Правильная цилиндрическая форма максимально упрощает как учет геометрии объекта, так и дальнейшее рассмотрение его гидродинамических характеристик.

В связи с вышеизложенным в качестве модельной формы фрагмента оплетки был выбран сплошной цилиндр с длиной $L=70$ мм (медианное значе-

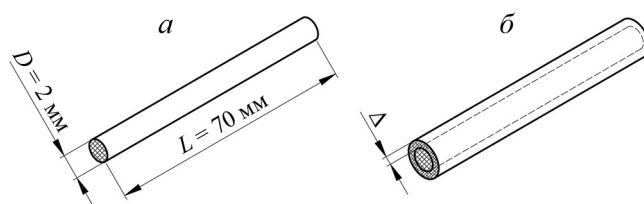


Рис. 2. Модельная форма фрагмента оплетки габионной сетки: *a* – до начала биообрастания; *б* – в момент, когда толщина слоя биообрастания равна Δ .

Fig. 2. Model shape of a fragment of a gabion mesh coating: *a* – before the start of biofouling; *b* – at the moment when the thickness of the biofouling layer is equal to Δ .

ние длины по результатам обследований пляжей Калининградской области в 2018–2020 гг.) и диаметром $D=2$ мм [2] (рис. 2*а*). Поскольку до начала процесса биообрастания $L \gg D$, предполагается, что за счет биообрастания увеличивается только эффективный диаметр D объекта, и моделируемым параметром, зависящим от времени, является толщина слоя биообрастания Δ (рис. 2*б*).

Если исходный объем пластика во фрагменте оплетки длиной L и диаметром D_p составляет V_p , а выросший на нем объем водорослей – V_a , то с учетом биообрастания новый диаметр фрагмента оплетки можно вычислить по формуле (1), а толщину слоя биообрастания по формуле (2):

$$D = 2\sqrt{\frac{V_a + V_p}{\pi L}}, \quad (1)$$

$$\Delta = (D - D_p)/2. \quad (2)$$

Методика расчета объема слоя биообрастания. Моделирование всех стадий развития биопленки на твердом субстрате в водной среде, начиная от колонизации бактериями до формирования сложного сообщества зрелых макроорганизмов, крайне сложно и выходит далеко за рамки данной работы. Поэтому мы будем использовать упрощенный подход, предполагая, что наш объект (фрагмент оплетки) находится в водной среде, содержащей некий определенный тип микроводорослей с постоянной концентрацией. Эти микроводоросли, во-первых, прилипают к нему при его движении, а, во-вторых, уже прилипшие к поверхности водоросли увеличиваются в объеме (растут) с некой фиксированной скоростью. Тогда, согласно [3], количество микроводорослей A (шт./м²) на единице площади поверхности фрагмента в произвольный момент времени может быть вычислено из решения дифференциального уравнения (3), а общий объем биоты V_a – по формуле (4):

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\beta_A C_A}{S} + (\mu - m)A, \quad (3)$$

$$V_a = V_A \cdot S. \quad (4)$$

Здесь S – площадь внешней поверхности фрагмента оплетки с учетом биообрастания ($S = \pi \cdot D \cdot L$); V_A – объем одной микроводоросли; β_A – коэффициент, характеризующий частоту столкновений частиц микроводорослей с фрагментом оплетки, м³/с; C_A – концентрация микроводорослей в одном кубометре водной среды, шт./м³; μ и m – коэффициенты, характеризующие скорости роста и отмирания водорослей соответственно, 1/с.

Первое слагаемое в правой части уравнения (3) моделирует прилипание водорослей к фрагменту оплетки в результате столкновений, а второе учитывает рост и отмирание водорослей, уже прилипших к фрагменту при заданной температуре и освещенности. Естественно, что в реальности температура и освещенность меняются непрерывно и в очень широких пределах в зависимости от времени года, времени суток, глубины, на которой находится фрагмент и пр. В данной работе рассматривается линейное приближение, при котором коэффициенты μ и m постоянны, и для них выбраны некие средние значения.

Перейдем к оценке значений параметров, входящих в уравнения (3) и (4), и прежде всего объема одной микроводоросли V_A . Поскольку колония биопленки состоит из огромного числа микроорганизмов самого разного размера и формы, таких как бактерии (~1 мкм), дрожжи (3–5 мкм), грибы (12–18 мкм), водоросли (~25 мкм) и т.д. [4], для целей моделирования необходимо как-то упростить ситуацию. В работах [5; 6] рассмотрены различные виды фитопланктона, встречающиеся в Балтийском море. Отмечается, что наиболее распространенными являются два вида сине-зеленых водорослей: *Aphanizomenon* sp. и *Nodularia spumigena*. Согласно работе [7] характерный объем одной микроводоросли *Aphanizomenon* sp. составляет 400–1500 мкм³, а *Nodularia spumigena* – 4000–8000 мкм³. То есть можно считать, что значение параметра V_A находится в пределах от $4 \cdot 10^{-16}$ до $8 \cdot 10^{-15}$ м³. Для простоты в дальнейших расчетах мы будем использовать значение $V_A = 1 \cdot 10^{-15}$ м³.

Согласно работам [5; 8] в июле – августе объем сине-зеленых водорослей на Балтике оценивается как величина порядка 200 мм³ на 1 кубометр. Если считать, что объем одной микроводоросли равен $V_A = 1 \cdot 10^{-15}$ м³, концентрация

микроводорослей в одном кубометре будет равна $C_A = 2 \cdot 10^{-7} / V_A = 2 \cdot 10^8$ шт./м³. В менее теплые месяцы (не июль – август) водоросли на Балтике также присутствуют, но в меньших количествах, поэтому в наших расчетах мы будем использовать несколько меньшее значение параметра C_A : $1 \cdot 10^8$ шт./м³.

Коэффициент β_A (м³/с) характеризует частоту столкновений микроводорослей с пластиком. На начальном этапе процесса биообрастания фрагмент оплетки ввиду положительной плавучести находится в поверхностном слое воды, где максимально влияние волн и течений. Увеличение количества микроводорослей будет происходить за счет прилипания их к поверхности объекта из-за разности скоростей движения обладающего инерцией объекта и воды, насыщенной микроводорослями. Согласно работе [3] для цилиндрических частиц $\beta_A = \gamma \cdot D^2 \cdot L$ м³/с, где γ (1/с) – коэффициент, зависящий от разности скоростей движения объекта и воды, который в нашем случае можно считать равным 2 (1/с).

Перейдем к оценке скорости роста водорослей (разности между коэффициентами μ и m уравнения (3)).

Скорость роста μ зависит как от вида водоросли, так и от условий окружающей среды, прежде всего от температуры, солености воды и освещенности. Для каждого вида есть определенные условия, при которых скорость роста максимальна. В работе [6] отмечается, что оптимальная температура для роста *Aphanizomenon* sp. находится в диапазоне от 16 до 31 °С, а оптимальная соленость – в диапазоне 0–5 PSU. Максимальная скорость роста составляет 0,18–1,34 дней⁻¹, или $2 \cdot 10^{-6}$... $1,5 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹. Вообще же рост этой сине-зеленой водоросли начинается уже при 5 °С. Для *Nodularia spumigena* оптимальная температура находится в диапазоне 20–25 °С, а оптимальная соленость – 5–10 PSU. Максимальная скорость роста составляет 0,13–0,6 дней⁻¹, или $1,5 \cdot 10^{-6}$... $7 \cdot 10^{-6}$ с⁻¹. Рост этой сине-зеленой водоросли также начинается при 5 °С. Вообще же максимальная скорость роста достигается только при идеальных условиях, которые редко встречаются в реальности, и реальная скорость роста всегда заметно ниже.

Отмирание может быть вызвано неблагоприятными условиями окружающей среды, такими как недостаток света, питательных веществ, неподходящая температура и соленость. Клетки микроводорослей могут быть инфицированы грибами или

вирусами. Кроме того, микроводоросли может поедать разнообразный зоопланктон. Как и в случае с коэффициентом μ , диапазон возможных значений коэффициента m очень широк. В работах [3; 6] для модельных задач рекомендуют использовать значения m в диапазоне от $0,05$ до $0,4$ дней⁻¹, или $6 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-6}$ с⁻¹.

Поскольку в задачи исследования не входил модельный учет влияния условий окружающей среды на скорость роста или отмирания микроводорослей, необходимо было выбрать какое-то одно числовое значение для этих параметров. В результате решено было остановиться на значении $(\mu - m) = 1 \cdot 10^{-6}$ с⁻¹.

Подставляя числовые значения рассмотренных выше параметров в уравнения (1)–(4), получаем следующую систему уравнений для поиска объема микроводорослей V_a на цилиндрическом фрагменте и расчета диаметра и площади поверхности фрагмента с учетом биообрастания:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = \frac{\beta_A C_A}{S} + (\mu - m)A \approx D(t) \cdot 10^8 + A \cdot 10^{-6} \\ V_a = V_A \cdot A \cdot S(t) \approx A \cdot S(t) \cdot 10^{-15} \\ D(t) = 2\sqrt{\frac{V_a + V_p}{\pi L}}, S(t) = \pi \cdot L \cdot D(t) \end{cases}, (5)$$

где $D(t)$, $S(t)$ – зависящие от времени диаметр и площадь поверхности покрытого биопленкой модельного цилиндрического фрагмента.

Уравнения системы (5) можно преобразовать. Подставив выражения для V_a и $S(t)$ в выражение для $D(t)$, получим квадратное уравнение относительно $D(t)$:

$$D(t)^2 - 4AV_A \cdot D(t) - D_p^2 = 0. (6)$$

Поскольку первый и последний коэффициенты квадратного уравнения имеют разные знаки, то корни уравнения существуют и имеют разные знаки. Положительный корень уравнения (6) и является диаметром цилиндра при наличии биопленки. Тогда систему (5) можно переписать в виде с двумя неизвестными, $D(t)$ и $A(t)$:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = \frac{\beta_A C_A}{S} + (\mu - m)A \approx D(t) \cdot 10^8 + A \cdot 10^{-6} \\ D(t) = 2AV_A + \sqrt{(2AV_A)^2 + D_p^2} \end{cases}. (7)$$

Подставив выражение для $D(t)$ в дифференциальное уравнение системы (7), можно избавиться от необходимости решать систему дифференциального и обыкновенных уравнений и решать лишь

одно дифференциальное уравнение относительно A . Однако аналитического решения это уравнение не имеет, а конечной целью моделирования является не вычисление количества микроводорослей на единице площади фрагмента пластика, а получение в явном виде зависимости от времени толщины биопленки или диаметра пластика с учетом биообрастания. Иными словами, в любом случае придется искать $D(t)$.

Для решения дифференциального уравнения можно воспользоваться любым явным численным методом решения задач Коши, например Эйлера или Рунге – Кутта. Решение методом Рунге – Кутта и было реализовано в настоящей работе. Расчеты выполнены в математическом пакете Mathcad с использованием простой итерационной схемы по времени, а именно: значения параметров, будь то дифференциальное или обыкновенное уравнение, на следующем шаге по времени вычислялись исходя из известных значений на текущем шаге.

Более детально последовательность модельных расчетов выглядела так. В начальный момент времени водоросли на фрагменте оплетки отсутствуют ($A=0$), а его диаметр равен начальному значению D_p . На следующем временном шаге начинается процесс биообрастания, и на фрагменте появляются водоросли, количество A которых на единице площади поверхности вычисляется из решения дифференциального уравнения системы (7) по явной схеме Рунге – Кутта. Затем по второму уравнению системы находим диаметр пластикового цилиндра $D(t)$ с учетом биообрастания. Далее происходит сдвиг на шаг по времени, и все расчеты повторяются.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего интерес представляет решение уравнения (3), где вычисляется параметр A – количество микроводорослей на единице площади поверхности фрагмента оплетки, шт./м². Правая часть уравнения содержит два слагаемых. Первое соответствует росту числа микроводорослей за счет прилипания к поверхности фрагмента из-за движения в морской воде, а вторая описывает экспоненциальный рост колонии микроорганизмов (так как отрицательная обратная связь отсутствует). На рисунке 3 приведено решение уравнения (3), если учитываются оба слагаемых (сплошная линия) и если учитывается только налипание – первое слагаемое (пунктирная линия). Видно, что на начальном

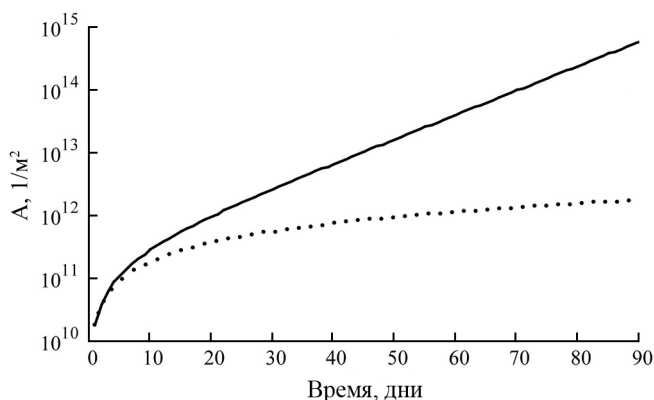


Рис. 3. Зависимость числа микроводорослей на единице площади поверхности фрагмента оплетки от времени – сплошная кривая, тот же параметр без учета экспоненциального роста числа микроводорослей – пунктирная линия. Масштаб по оси OY – логарифмический.

Fig. 3. Dependence of the number of microalgae per unit area on the surface of the coating fragment against time – solid curve, the same parameter without taking into account the exponential growth in the number of microalgae – dotted line. Scale along the OY axis is logarithmic.

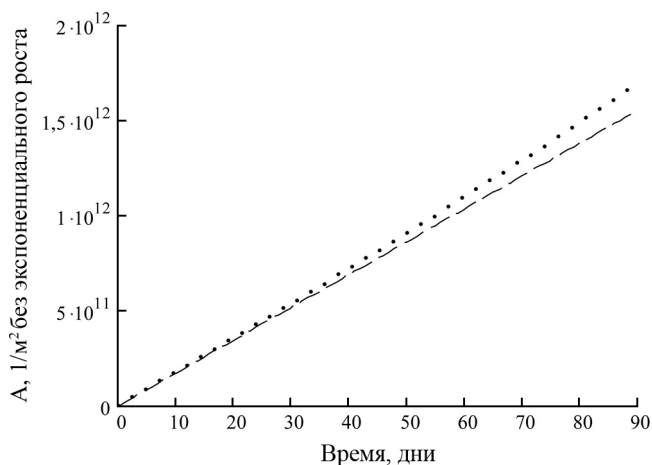


Рис. 4. Зависимость числа микроводорослей от времени с учетом только налипания, то есть первого слагаемого правой части уравнения (3). Пунктирная линия – с учетом увеличения диаметра за счет биообрастания; штриховая линия – тот же параметр без учета увеличения диаметра (линейная зависимость). Масштаб по оси OY – логарифмический.

Fig. 4. Dependence of the number of microalgae against time if we take into account only adhesion, i.e. the first term on the right side of equation (3). Dashed line – taking into account the increase in diameter due to biofouling; dotted line – the same parameter without taking into account the increase in diameter (linear dependence). Scale along the OY axis is logarithmic.

этапе (первые 2–3 дня) количество микроводорослей на поверхности растет практически исключительно из-за движения фрагмента оплетки в насыщенной водорослями воде. Но начиная с 5–10 дня биологический рост становится доминирующим, график – линейным в логарифмических координатах, а значит, возникает экспоненциальный рост количества микроводорослей на поверхности. По оси OY на рисунке 3 выбран логарифмический масштаб, чтобы стало отчетливо видно, когда рост становится практически экспоненциальным. Так, начиная примерно с 20-го дня кривая роста превращается практически в прямую линию, то есть влияние первого слагаемого уравнения (3) на скорость роста становится пренебрежимо малым.

Интересно было также выяснить, насколько сильную нелинейность вносит в первое слагаемое правой части уравнения (3) изменение диаметра фрагмента оплетки с учетом биообрастания. Оказалось, что нелинейность относительно небольшая (рис. 4): здесь пунктирная линия – влияние первого слагаемого правой части (3) с учетом изменения диаметра, а штриховая – при постоянном диаметре, равном начальному (второе слагаемое правой части (3) совсем не учитывалось, то есть оценивался случай, когда рождение компенсируется отмиранием). На рисунке 4 масштаб по оси OY уже не логарифмический, и прямая линия (штриховая) соответствует линейной зависимости числа микроводорослей от времени.

Перейдем к рассмотрению зависимости от времени диаметра пластикового фрагмента с учетом биообрастания, а также толщины биопленки. Зависимость диаметра от времени показана на рисунке 5. По оси OY выбран логарифмический масштаб, чтобы было проще оценить, начиная с какого момента зависимость диаметра от времени становится практически экспоненциальной. Видно, что при выбранных значениях параметров это происходит примерно на 50–60-й день. При этом в числовом выражении значение диаметра становится равным примерно 1 см, то есть в 5 раз больше, чем исходный диаметр, равный 2 мм. К 80-му дню диаметр «биообросшего» фрагмента становится равным 10 см, что уже превышает длину фрагмента. Очевидно, что допущение $L \gg D$ в таком случае уже давно не выполняется. Можно предполагать, что использованная модель объекта достаточно корректно работает до тех пор, пока диаметр с учетом биообрастания не превысит 1 см. Как уже отмечалось, при выбранных значениях числовых коэффициентов это происходит приблизительно на 50–60-й день. Если требуется рассмотрение дальнейшего увеличения толщины биослоя, следует, видимо, использовать модельную форму не цилиндра, а эллипсоида или даже сферы.

Толщина слоя биообрастания в зависимости от времени представлена на рисунке 6. Здесь масштаб по оси OY уже не логарифмический, чтобы легче воспринимались значения числовых величин. Видно, что до 40–60-го дня толщина слоя очень мала, а затем начинает стремительно увеличиваться. Следует в очередной раз обратить внимание на то, что временные рамки определяются выбранными при моделировании числовыми значениями констант, входящих в уравнение (3).

Интересно было провести сравнение полученных модельных результатов с экспериментальными исследованиями. Так, в работе [9] описаны результаты изучения биообрастания методами конфокальной микроскопии и фотоакустической спектроскопии. Образцы различных материалов помещали в прибрежную морскую среду Гданьского залива Балтийского моря. Через определенные интервалы времени проводили измерения параметров, определяющих фазу развития и количество микроводорослей на образцах. Исследования показали следующее. В летние, наиболее благоприятные для биообрастания, месяцы первоначальная колонизация образца бактериями происходит за время порядка часа. Далее начинается формирование сложного субстрата, включающего цианобактерии и так называемые внеклеточные полимерные вещества, служащие связкой колонии в единое целое. Максимальная скорость роста числа цианобактерий достигается на 3–6-й день, а примерно на 10–12-й день увеличение количества цианобактерий прекращается. Далее основную роль в росте колонии играют диатомовые водоросли. Рост колонии с постепенным замедлением происходит еще примерно 50 дней. Затем рост практически прекращается. Таким образом, общее время, в течение которого происходит рост колонии микроорганизмов на субстрате в балтийской морской воде, составляет порядка двух месяцев.

Сопоставление полученных авторами работы [9] экспериментальных данных с результатами моделирования позволяет заключить следующее. Во-первых, временные рамки модельного процесса биообрастания выглядят достаточно разумными. Во-вторых, по всей вероятности, в течение первых двух месяцев модельную толщину слоя биообрастания можно считать более-менее удовлетворительным приближением к реальным значениям.

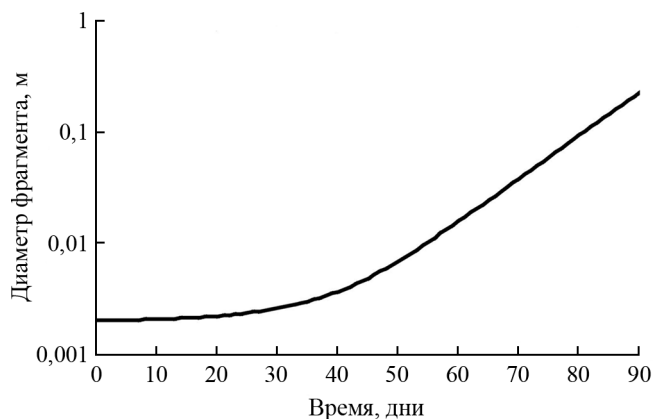


Рис. 5. Зависимость от времени диаметра фрагмента оплетки с учетом биообрастания. Масштаб по оси OY — логарифмический.
Fig. 5. Dependence of the diameter of the coating fragment on time, taking into account biofouling. Scale along the OY axis is logarithmic.

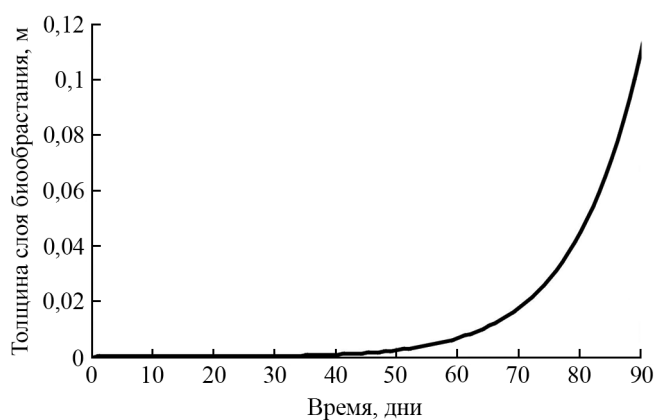


Рис. 6. Зависимость от времени толщины слоя биообрастания.
Fig. 6. Dependence of the layer of the biofouling on time.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модель, учитывающая два механизма, обеспечивающих рост микроводорослей при образовании биопленки на находящемся в водной среде объекте: налипание при движении объекта в насыщенной водорослями воде и собственно биологическое развитие микроводорослей уже в составе биопленки в средних для Балтийского моря условиях. Первый из этих механизмов преобладает на начальном этапе — 5–10 дней, а далее рост биопленки обеспечивается биологическим приростом микроводорослей, который затухает только из-за условий питания среды. В качестве модельного объекта, имитирующего пластиковые оплетки сетки габионов, выбран цилиндр. На основе сравнения с данными эксперимента границы применимости используемой модели оценены в 40–60 дней.

Полученные результаты предполагается использовать для учета влияния биообрастания на такие характеристики пластика, как плавучесть и гидродинамическое сопротивление, что, в свою очередь, необходимо для моделирования траекторий пластиковых частиц, распространяющихся от берегозащитных сооружений, расположенных на берегах Балтики.

В работе рассмотрена простейшая из возможных моделей, которая в дальнейшем может быть, конечно, улучшена и дополнена. Усовершенствования могут касаться как учета видового разнообразия (например, разделение цианобактерий и диатомовых водорослей), так и коррекции численных оценок коэффициентов модели, а также учета зависимостей этих коэффициентов от температуры, освещенности и т.п. Однако корректно подобные улучшения невозможно сделать, не имея достаточного объема экспериментальных данных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Балтийскому федеральному университету имени Иммануила Канта за возможность представления результатов на конференции «XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования». Авторы также выражают глубокую благодарность рецензентам, замечания которых позволили как избавиться от мелких ошибок и опечаток, так и более четко сформулировать цель и задачи статьи, для чего были внесены правки в название и в текст работы. Анализ литературы, разработка методики и проведение расчетов выполнены при поддержке ИО РАН в рамках госзадания (тема № FMWE-2021-0012), получение исходных данных для расчетов, анализ и интерпретация результатов – при поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-55-76002 (ERA.net RUS EI-GEO).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. Domnin D., Burnashov E. 2022. Geographical information dataset “geosynthetics in coastal protection of the South-East Baltic”. *Data in Brief*. 40: 107693. doi: 10.1016/j.dib.2021.107693
2. Chubarenko B., Kilesa A., Esiukova E., Pinchuk V., Simon F.-G. 2022. Dataset on geosynthetic material debris contamination of the South-East Baltic shore. *Data in Brief*. 40: 107778. doi: 10.1016/j.dib.2021.107778
3. Kooi M., van Nes E.H., Scheffer M., Koelmans A.A. 2017. Ups and downs in the ocean: effects of biofouling on vertical transport of microplastics. *Environmental Science and Technology*. 51(14): 7963–7971. doi: 10.1021/acs.est.6b04702
4. Eberl H., Morgenroth E., Noguera D., Picioreanu C., Rittmann B., van Loosdrecht M., Wanner O. 2006. *Mathematical modeling of biofilms*. IWA publishing: 208 p. doi: 10.2166/9781780402482
5. Olofsson M., Suikkanen S., Kobos J., Wasmund N., Karlson B. 2020. Basin-specific changes in filamentous cyanobacteria community composition across four decades in the Baltic Sea. *Harmful Algae*. 91: 101685. doi: 10.1016/j.hal.2019.101685
6. Munkes B., Löptien U., Dietze H. 2021. Cyanobacteria blooms in the Baltic Sea: a review of models and facts. *Biogeosciences*. 18: 2347–2378. doi: 10.5194/bg-18-2347-2021
7. Olenina I., Hajdu S., Edler L., Andersson A., Wasmund N., Busch S., Göbel J., Gromisz S., Huseby S., Huttunen M., Jaanus A., Kokkonen P., Ledaine I., Niemkiewicz E. 2006. Biovolumes and size-classes of phytoplankton in the Baltic Sea. *Baltic Sea Environment Proceedings*. 106: 1–144.
8. Jaanus A., Jakobsen H.H., Johansen M., Johansson M., Jurgensone I., Kraśniewski W., Lehtinen S., Olenina I., Weber M., Wasmund N. Cyanobacteria biomass 1990–2018. *HELCOM*. Available at: <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/eutrophication/cyanobacteria-biomass/> (accessed 2 August 2021).
9. Grzegorzczak M., Pogorzelski S.J., Pospiech A., Boniewicz-Szmyt K. 2018. Monitoring of marine biofilm formation dynamics at submerged solid surfaces with multitechnique sensors. *Frontiers in Marine Science*. 5: 363. doi: 10.3389/fmars.2018.00363

Поступила 31.05.2022