

3. Павловский Н. Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения : Собр. соч. в 2 т.— М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1956.— Т. 2.— С. 3—352.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем.— М. : Наука, 1983.— 616 с.
5. Уилкинсон Дж., Райни К. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра.— М. : Машиностроение, 1976.— 391 с.
6. Anderson M. P. Using models to simulate the movement of contaminants through groundwater flow systems // CRC Crit. Rev. Environ. Control.— 1979.— 9, N 2.— P. 97—156.
7. Kinzelbach W. K. H., Frind E. O. Accuracy criteria for advectiondispersion models // Proc. of 6-th Intern. Conf. on Finite Elements in Water Resource— Lisboa, Portugal (June 1986).—Berlin etc. : Springer.— 1986.— P. 489—501.

Киев. ун-т им. Т. Г. Шевченко

Получено 25.01.89

УДК 551.464.38.001.57:574.635

В. М. МОСКОВКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ИСКУССТВЕННЫХ ЭКОГЕОСИСТЕМАХ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ МОРЯ

Предложена модель динамики пляжеобразующих и взвешенных наносов в искусственных экогеосистемах береговой зоны моря, которая состоит из уравнений баланса материала для пляжеобразующих и непляжеобразующих (взвешенных) фракций, с учетом осцилляционных факторов истирания наносов при волновом воздействии, искусственной подсыпки материала, биофильтрации и рекреации.

Существующая практика создания искусственных пляжей с полным укреплением берегов и постоянной (часто нерациональной) подсыпкой материала привела к полной деградации прибрежных морских биогеоценозов Крыма, Кавказа и других регионов страны, в результате чего резко ухудшились качество природной среды прибрежной зоны и возможности ее рекреационного использования. В этой связи становится актуальной задача расчета, проектирования и создания гидробиоинженерных сооружений биофильтрационного типа в береговой зоне моря. На примере условий, характерных для Южного берега Крыма (ЮБК), рассмотрены теоретические основы моделирования динамики искусственных экогеосистем береговой зоны моря с учетом процессов динамики искусственных пляжей и различных осцилляционных нагрузок и факторов.

Поперечная циркуляция в любой береговой зоне ограничена глубиной порядка $H = 0,3\lambda \div 0,5\lambda$, где λ — длина волны на глубокой воде. В периоды курортного сезона со слабой волновой активностью для ЮБК можно положить: $\lambda = 20$ м и $H = 10$ м. Средний уклон подводной отмели $i_{отм}$ составляет здесь 0,1 (тангенс угла наклона). Следовательно, объем треугольной циркуляционной ячейки (призмы) в пределах одного межбунного отсека равен $V = \frac{H^2 B}{2i_{отм}} = 25000$ м³, где $B = 50$ м — расстояние между двумя соседними бунами. Глубина 8—10 м оптимальна с технической и экологической точек зрения для размещения на ней гидробиоинженерных сооружений. Составим балансовую модель функционирования береговой экогеосистемы.

Уравнение баланса пляжеобразующего материала [3] для условий отсутствия его поступления с берега (укрепление клифа) записываем в виде

$$\frac{dW}{dt} = -k(t)W + u(t), \quad (1)$$

где $W > 0$ — объем пляжеобразующего материала на единицу длины береговой линии, м³/м; $k(t) > 0$ — коэффициент истирания пляжеобразующего материала, мес⁻¹; $u(t) \geq 0$ — месячный объем искусственной подсыпки пляжеобразующего материала, м³/мес; t — время, мес. Волновая активность (принятая пропорциональной произведению секундного потока энергии от-

© В. М. Московкин, 1990.

крытого моря через один погонный метр на среднюю продолжительность волнения для данной высоты волны на глубокой воде), прямо влияющая на коэффициент истирания, имеет периодичность 12 месяцев (ее максимум проявляется зимой, а минимум — летом). Простейшая тригонометрическая аппроксимация этого коэффициента для условий ЮБК, полученная на основе информации по высотам и периодам волн, продолжительности волнения [2]

$$k(t) = \frac{k_{\text{год}}}{6,195} \left(0,436 + 0,406 \sin \left(\frac{2\pi}{12} (t + 3) \right) \right), \quad (2)$$

где $k_{\text{год}}$ — головной коэффициент истирания материала, год^{-1} . При проектировании и эксплуатации искусственных пляжей ЮБК предполагается, что в течение первых 3—4 лет за счет истирания теряется около 2 % первоначального материала. Таким образом, в дальнейших расчетах положим $k_{\text{год}} = 0,02$.

Периодическую подсыпку материала на месячной основе аппроксимируем функцией

$$u(t) = u_0 \sin^n \left(\frac{2\pi}{24M} (t + 6M - \tau) \right), \quad (3)$$

где M — частота подсыпки (один раз в M лет); τ — запаздывание максимума подсыпки ($0 \leq \tau \leq 12$) по отношению к январскому максимуму волновой активности; n — большая четная степень, позволяющая имитировать кучочно-постоянный (дискретный) характер реального процесса подсыпки с помощью непрерывной периодической функции; u_0 — максимальный месячный объем подсыпки материала, $\text{м}^2/\text{мес}$. На практике обычно планируется общая подсыпка U , из которой можно определить u_0 , проинтегрировав на данном интервале выражение (3). При наиболее характерном случае $\tau = 0$ (подсыпка осуществляется зимой) получим следующую зависимость:

$$U = \frac{(n-1)!! 12M}{n!!} u_0, \quad (4)$$

откуда, например, при наиболее характерной для условий ЮБК подсыпке один раз в три года ($M = 3$), получим $u_0 = 0,123 U$ для $n = 12$; $u_0 = 0,113 U$ для $n = 10$.

Составляем теперь уравнение баланса для мелкодисперсной взвеси (непляжеобразующие фракции), которая подвергается очистке при биофильтрации. Баланс примесей, в отличие от уравнения (1), рассматриваем в одном межбунном отсеке. Уравнение динамики взвешенных веществ в воде при ее фильтрации двустворчатыми моллюсками имеет вид [1]

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{\bar{n}v}{V} C,$$

где C — концентрация взвесей; V — заданный объем воды, в котором рассматривается динамика взвесей; v — скорость фильтрации воды одной особью; \bar{n} — количество особей. Введя в последнее уравнение коэффициент α ($0 \leq \alpha \leq 1$), показывающий эффективность очистки воды (долю улавливаемых взвесей при их биофильтрации), получаем уравнение

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{\alpha \varepsilon(t) F}{V} C, \quad (5)$$

где F — площадь фильтрующей поверхности, м^2 ; $\varepsilon(t)$ — фильтрационная способность поверхности, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}^{-1})$ (C и V измеряются соответственно в килограммах на метр кубический и в кубических метрах).

В случае наиболее характерного для ненарушенных условий ЮБК мидиевого биоценоза имеем: $150 \leq \varepsilon(t) \leq 280 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}^{-1})$, $0,7 \leq \alpha \leq 1$.

Уравнение баланса взвешенных веществ на месячной основе в рассматриваемом межбунном отсеке записываем в виде

$$\frac{d(CV(t))}{dt} = -30\alpha\varepsilon(t)FC + \rho_1 Bk(t)W + \delta\rho_2 Bu(t) + R(t), \quad (6)$$

где 30 — коэффициент пересчета фильтрационной способности на месячную основу; второй член — поступление взвесей (непляжеобразующих фракций) в процессе истирания пляжеобразующего материала; ρ_1 — плотность взвешенного материала, поступающего в процессе истирания, кг/м³; δ — доля мелкодисперсных взвешенных фракций в подсыпаемом материале; ρ_2 — плотность этих фракций, кг/м³; $R(t)$ — рекреационная нагрузка на прибрежную зону в пересчете на мелкодисперсную взвесь, кг/мес; $V(t) = \frac{(0,5\lambda(t))^2}{2i_{отм}} B$.

Остальные возможные источники поступления мелкодисперсного материала в рамках рассматриваемой искусственной береговой системы в данном случае не рассматриваются. Величина δ берется на основе результатов натуральных исследований или рассчитывается следующим образом. Объем однородного подсыпаемого материала в плотном теле равен $(1 - P)u$, где P — пористость материала (в долях от единицы). Объем одного обломка среднего диаметра d_2 ($d_2 = 40$ мм для условий ЮБК) равен $\frac{\pi}{6}d_2^3$, тогда общее количество обломков определяется формулой $(1 - P)u / \frac{\pi}{6}d_2^3$, а их активная поверхность — выражением

$$4\pi \left(\frac{d_2}{2}\right)^2 \frac{(1 - P)u}{\pi d_2^3/6} = \frac{6(1 - P)u}{d_2}.$$

Эту поверхность обволакивает монослой пылеватых (глинистых) частиц высотой, равной характерному их размеру d_1 , тогда объем всего суммарного слоя равен $\frac{6(1 - P)ud_1}{d_2}$, откуда δ равняется

$$\delta = \frac{6(1 - P)d_1}{d_2}. \quad (7)$$

Размер d_1 может браться порядка одного или нескольких десятков микрон. Функция $\varepsilon(t)$ предполагается периодической (период 12 месяцев) с максимумом в летний сезон и минимумом — в зимний

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \sin\left(\frac{2\pi}{12}(t - 3)\right). \quad (8)$$

Учитывая, что $150 \leq \varepsilon(t) \leq 280$, берем $\varepsilon_0 = 210$ и $\varepsilon_1 = 70$. Рекреационная периодическая (период 12 месяцев) нагрузка, зависящая от динамики численности отдыхающих на пляже в течение года, может аппроксимироваться выражением (минимальная нагрузка — зимой, максимальная — летом).

$$R(t) = R_0 \sin^N\left(\frac{2\pi}{24}t\right), \quad (9)$$

где N — четная положительная степень. В дальнейших расчетах величину $V(t)$ берем постоянной и рассчитываем ее по формуле объема межбунного отсека (треугольная призма)

$$V = \frac{l^2 i_{отм}}{2} B, \quad (10)$$

где l — расстояние от уреза воды до рассматриваемого створа, м. Связь между концентрацией взвешенных веществ и их массой в межбунном отсеке $M(t)$ выражается соотношением

$$M(t) = \frac{c(t)V}{1000}, \quad (11)$$

где $M(t)$ и $C(t)$ имеют соответственно размерности кг и мг/л.

Учитывая все приведенные уравнения и соотношения [1—3, 6—9], записываем окончательную динамическую систему второго порядка, описывающую баланс пляжеобразующего и взвешенного материала в береговой зоне

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} = & -\frac{k_{\text{год}}}{6,195} \left[0,436 + 0,406 \sin \left(\frac{2\pi}{12} (t + 3) \right) \right] W + \\ & + u_0 \sin^n \left(\frac{2\pi}{24M} (t + 6M - \tau) \right), \\ \frac{dM}{dt} = & -30\alpha F \left(\varepsilon_0 + \varepsilon_1 \sin \left(\frac{2\pi}{12} (t - 3) \right) \right) \frac{M}{V} + \rho_1 B \frac{k_{\text{год}}}{6,195} \left[0,436 + \right. \\ & + 0,406 \sin \left(\frac{2\pi}{12} (t + 3) \right) \left. \right] W + \frac{6(1-P)d_1}{d_2} \rho_2 B u_0 \sin^n \left(\frac{2\pi}{24M} (t + 6M - \tau) \right) + \\ & + R_0 \sin^N \left(\frac{2\pi}{24} t \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Система решается численно методом Рунге—Кутты с помощью стандартной фортрановской подпрограммы DRKGS (удвоенная точность). В связи со сложной правой частью системы (12) использование обычной подпрограммы RKGS приводит к численной неустойчивости и искаженным нерегулярным осциллирующим решениям. Это устраняется с помощью подпрограммы DRKGS (рис. 1).

Экспериментальным путем достигнута оптимальная точность порядка 10^{-7} — 10^{-9} при удвоенной разрядности констант и переменных. В процессе

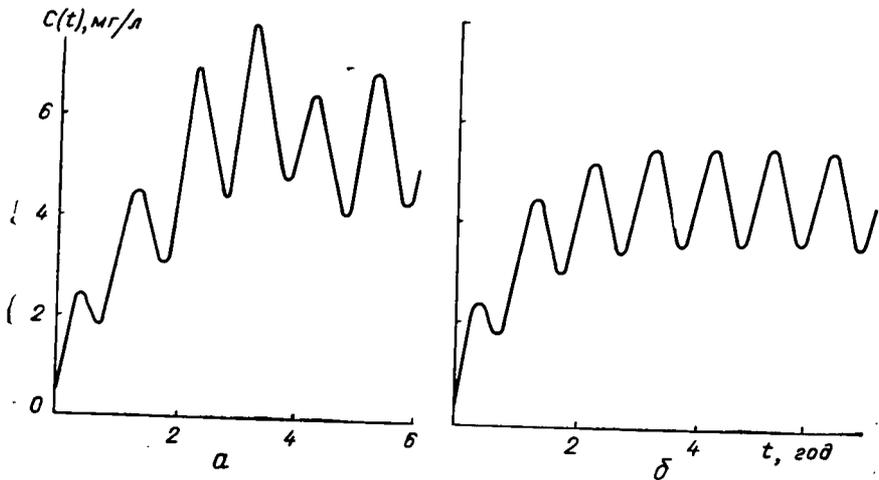


Рис. 1. Пример расчета концентрации взвешенных веществ по системе уравнений (12) на основе подпрограммы RKGS (а) — и на основе подпрограммы DRKGS (б)

численных экспериментов величина $W(t)$ оптимизировалась на уровне 100 м^2 — расчетная проектная величина объема пляжа на один погонный метр берега для условий ЮБК (при $u_0 = 0,6 \text{ м}^2/\text{мес}$; $n = 10$; $M = 3$; $\tau = 0$; $k_{\text{год}} = 0,02 \text{ год}^{-1}$). Этот же результат получен при осреднении первого уравнения системы (12) по соответствующим периодам в предположении стационарности процесса ($\frac{dW}{dt} = 0$). Здесь при $\tau = 0$, $M = 3$, $n = 10$ получено соотношение $W_{\text{ст}} = 3,5 u_0/k_{\text{год}}$, откуда при $k_{\text{год}} = 0,02 \text{ год}^{-1}$ и $W_{\text{ст}} = 100$ получаем $u_0 = 0,57 \text{ м}^2/\text{мес}$, что близко к ранее полученной величине ($u_0 = 0,6 \text{ м}^2/\text{мес}$).

При таком же осреднении получено выражение для $C_{ст}$ (стационарного уровня концентрации взвесей, вокруг которого происходят колебания $C(t)$)

$$C_{ст} = \left\{ \overline{R(t)} + \frac{6(1-P)d_1}{d_2} \rho_2 B \overline{u(t)} + \frac{k_{год}}{6,195} \rho_1 B \cdot 0,436 W_{ст} \right\} \frac{1000}{30\alpha F \epsilon_0}, \quad (13)$$

где, например, при $\tau=0$; $M=3$; $n=10$; $N=10$ имеем $\overline{u(t)} = \frac{8,86u_0}{36}$ и $\overline{R(t)} = 0,246 R_0$ (черта означает осреднение по периоду функции). Если, например, необходимо поддерживать среднюю концентрацию $C_{ст}$ на уровне 5 мг/л, тогда из выражения (13) (при $B=50$ м; $\rho_1 = \rho_2 = 2000$ кг/м³; $\epsilon_0 = 210$ м³/(м²·сут⁻¹); $d_2 = 40$ мм; $u_0 = 0,6$ м²/мес; $P = 0,5$; $k_{год} = 0,02$ год⁻¹; $W_{ст} = 100$ м²) получаем критериальное выражение

$$R_0 = 128\alpha F - 4500d_1 - 57195,7. \quad (14)$$

Здесь F и d_1 измеряются соответственно в м² и мм, а R_0 — в кг/мес. В интервалах $0,01 \leq d_1 < 0,1$ мм, $0,7 \leq \alpha \leq 0,9$, и в окрестности нулевых рекреационных нагрузок ($R_0 \approx 0$) расчетные площади F , необходимые для поддержания $C_{ст} = 5$ мг/л, составят 500—650 м² на один межбунный отсек. При тех же параметрах из выражения (13) может быть получена следующая критериальная зависимость:

$$d_2 = \frac{44298d_1}{31,5\alpha F - 14076 - R_0 \cdot 0,246}. \quad (15)$$

Здесь зависимость d_2 от F имеет вид гипербол, сильно прижимающихся к осям d_2 и F . Влияние R_0 на F в формулах (14, 15) слабое.

Если основной целью является только снятие рекреационной нагрузки (в уравнении баланса учитываются только биофильтрационный и рекреационный члены), что для практических целей наиболее реально, тогда для поддержания концентрации взвесей на уровне фоновой порядка 1 мг/л получаем из выражения (13) соотношение

$$0,246R_0 = 6,3\alpha F, \quad (16)$$

откуда, например при $\alpha = 0,8$, будем иметь $F = 0,049 R_0$, тогда, приняв характерную месячную нагрузку порядка 1000 кг/мес, на один межбунный отсек получаем F порядка 50 м². Создание гидробиоинженерных сооружений такой мощности (1 м² на один погонный метр берега) не требует больших затрат.

Наши ориентировочные расчеты показали, что если их создавать даже на базе дорогостоящих железобетонных конструкций, то общая капитальная стоимость будет составлять не более одного процента от стоимости современной берегозащиты на ЮБК в пересчете на один погонный метр берега. А если им придавать дополнительно берегозащитные функции (волногашение, препятствие безвозвратному уносу гальки на глубину), то эффект будет еще более очевиден. Рассчитанная площадь ($F = 50$ м²) позволяет профильтровать за сутки $50 \text{ м}^2 \cdot 210 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ сут} = 10500 \text{ м}^3$ воды, что более чем в полтора раза превышает объем воды в межбунном пространстве рекреационной зоны (зоны купания, удаленной на 50 м от берега: $V = \frac{50^3 \cdot 0,1}{2} = 6250 \text{ м}^3$ (формула (10)). В принципе этот упрощенный подход,

основанный на анализе усредненных уравнений, решает задачу расчета гидробиоинженерных сооружений. Полные же решения динамической системы (12) необходимы для получения информации о скорости выхода на стационарный режим, амплитудных колебаний качества воды и др. ■

По системе уравнения (12) проведено большое количество численных экспериментов (около 40 вариантов на ЭВМ ЕС-1060), которые показали, что для поддержания концентрации взвесей на среднегодовом уровне 1—1,5 мг/л и искусственных пляжей на уровне 100 м³/м необходимы очень большие площади фильтрующей поверхности ($F = 2000—3000$ м²), что мо-

жет быть достигнуто только восстановлением естественных донных биоценозов. Например, в межбунном донном пространстве от изобаты 5 м (средняя граница рекреационной зоны) до изобаты 10 м (средняя граница береговой зоны поперечной циркуляции в теплый сезон) имеется запас площади в размере $50 \text{ м} \times 50 \text{ м} = 2500 \text{ м}^2$. Но, как говорилось выше, для снятия только рекреационной нагрузки необходимы площади, на два порядка меньше. К тому же следует заметить, что отмеченный выше уровень (1—1,5 мг/л) являлся среднегодовым и при $F = 400 \text{ м}^2$ (минимальная площадь в наших численных экспериментах) в майские и летние месяцы удается поддерживать концентрацию, не превышающую 2—3 мг/л. Стационарный режим во всех вариантах устанавливается быстро через 1—2 года (расчеты

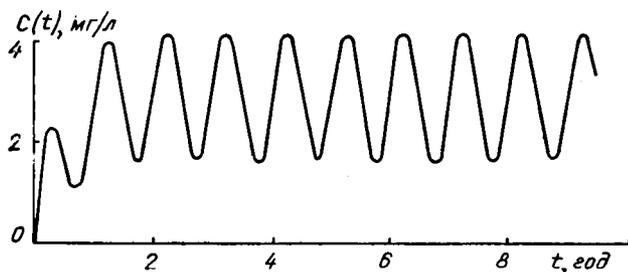


Рис. 2. Пример расчета концентрации взвешенных веществ по системе уравнений (12)

велись на месячной основе до 20 лет). В случае увеличения коэффициента истирания до $0,4 \text{ год}^{-1}$ могут возникать ситуации потери 40 % объема пляжа за счет истирания и уноса). Для поддержания $W_{\text{ст}}$ на уровне $100 \text{ м}^3/\text{м}$ необходимо увеличить максимальный месячный объем подсыпки до $10—12 \text{ м}^2/\text{мес}$, что приводит к большим амплитудам колебаний функции $C(t)$ (от 2,5 до 135 мг/л на интервале 20 лет).

Наибольший вклад в динамику процесса дает подсыпка материала, на ее фоне ($u_0 = 0,6 \text{ м}^2/\text{мес}$) вклад других нагрузок незначителен. Например, при изменении R_0 от 0 до $1000 \text{ кг}/\text{мес}$ $C_{\text{ст}}$ изменяется не более, чем на 0,5—1 мг/л. В качестве примера приводим расчет концентрации взвешенных веществ по системе уравнения (12) с использованием подпрограммы RKGS, которая приводит к искаженным результатам, и с использованием подпрограммы с удвоенной точностью (см. рис. 1). Исходные параметры без указания размерностей следующие: $n = 10$; $N = 10$; $u_0 = 0,6$; $k_{\text{год}} = 0,02$; $\tau = 0$; $M = 3$; $\varepsilon_0 = 210$; $\varepsilon_1 = 70$; $i_{\text{отм}} = 0,1$; $B = 50$; $\rho_1 = \rho_2 = 1500$; $\alpha = 0,9$; $F = 400$; $d_1 = 0,01$; $d_2 = 40$; $l = 100$; $P = 0,5$; $R_0 = 0$; $W(0) = 100$; $\tilde{M}(0) = 10$ ($C(0) = 0,4$). Расчетные значения: $C_{\text{ст}} = 4,69$; $A_{\text{ст}} = 1,98$ (стационарная амплитуда концентраций). Приводим также пример расчета функции $C(t)$ (рис. 2) при следующих параметрах: $\alpha = 1$; $F = 800$; $P = 0,8$; $R_0 = 100$; $\tilde{M}(0) = 0$ (остальные параметры те же, что и в предыдущем расчете; расчетные значения — $C_{\text{ст}} = 2,93$; $A_{\text{ст}} = 2,50$).

1. Алимов А. Ф. Функциональная экология пресноводных двухстворчатых моллюсков. — Л.: Наука, 1981. — 248 с.
2. Атлас волнений и ветра Черного моря. — Л.: Гидрометеоздат, 1966. — 220 с.
3. Московкин В. М., Есин Н. В. Оптимальное управление абразивным процессом // Докл. АН СССР. — 1985. — 284, № 3. — С. 731—734.