

**ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК СССР**

1983

ТОМ 270 № 1

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

Н.В. ЕСИН, В.А. ДМИТРИЕВ, В.М. МОСКОВКИН
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ
БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ АБРАЗИОННОГО БЕРЕГА

(Представлено академиком И.П. Герасимовым 13 VI 1982)

Одной из важных задач океанологии, имеющей как научное, так и прикладное значение, является прогнозирование развития морских берегов с учетом техногенного воздействия человека. Еще нет теории, достаточно надежно описывающей этот процесс. В настоящей работе предлагается простая полуэмпирическая модель эволюции береговой линии абразионного берега, учитывающая практически все возможные случаи вмешательства человека в естественные процессы. Она применима также и для описания геологического процесса — развития шельфа в условиях колебания уровня Мирового океана.

В [1] по данным многолетних натурных наблюдений на берегах, сложенных глинами и суглинками, установлена зависимость нормальной [2] скорости отступления клифа V от объема (на единице длины берега) обломочного материала W . В первом приближении (при $W > 0$) ее можно аппроксимировать гиперболой [3]. Для берегов, сложенных прочными породами, в разрушении которых существенную роль играет абразивное воздействие обломочного материала, зависимость $V(W)$ близка к параболической [2]. Анализ механизма абразии показал, что зависимость

$$(1) \quad V = B(W + \epsilon)/(W + r)^2$$

является универсальной, пригодной для описания разрушения любых пород (B , ϵ , r — коэффициенты, подбираемые по данным натурных наблюдений). Направив ось X вдоль генерального направления берега, а ось Y — в сторону моря (в плоскости горизонта), получим из (1) с учетом кинематического выражения для V [2]

$$(2) \quad y_t = B(W + \epsilon)/(1 + y_x^2)^{0,5}/(W + r)^2.$$

Здесь и ниже индекс внизу указывает переменную, по которой проводится дифференцирование.

Для замыкания (2) составим уравнение баланса обломочного материала в прибойной зоне, как это сделано в [3], но с учетом его вдольберегового перемещения:

$$(3) \quad W_t = aVH - kW - Q_x + F(x, t),$$

где $H(x, y, t)$ — высота клифа, м; a — доля в породах, слагающих берег, пляжеобразующего материала; k — коэффициент истираемости наносов, год⁻¹; Q — расход вдольберегового потока наносов, м³/год; $F(x, t)$ — распределение на берегу источников и стоков обломочного материала, не имеющих отношения к абразии (например, русло реки, участок отсыпки искусственного пляжа, карьер, где обломочный материал выбирается и т.д.), м³/м · год.

Вдольбереговое движение наносов можно представить двумя составляющими, одна из которых M описывает детерминированный процесс (результатирующее зако-

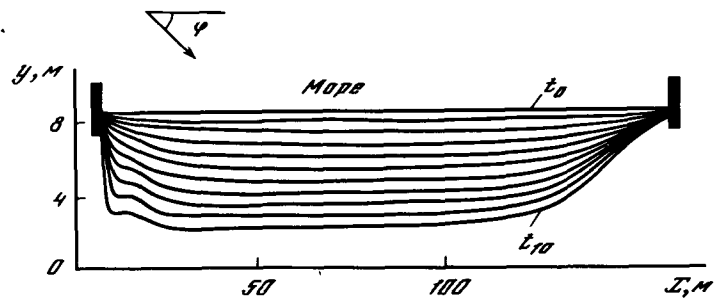


Рис. 1. Эволюция берега, укрепленного бунами, через каждые 50 лет

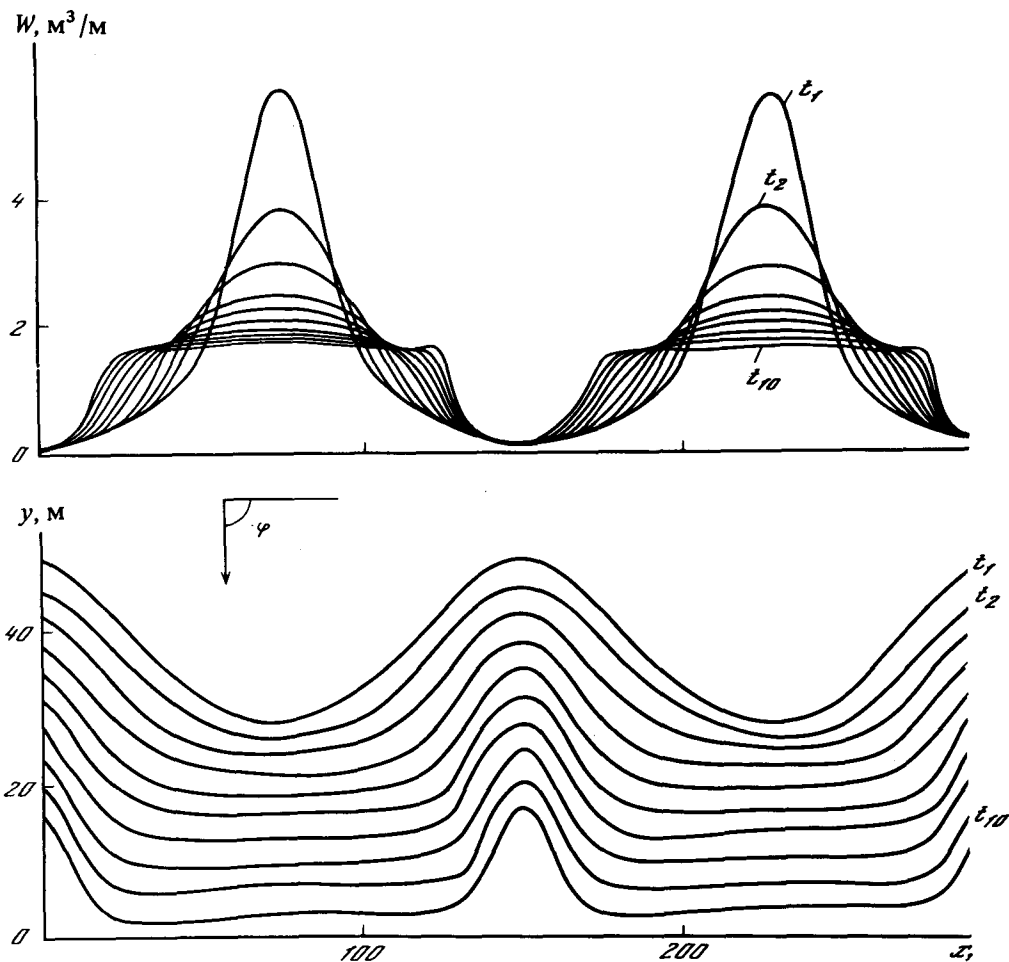


Рис. 2. Перераспределение обломочного материала, развитие береговой линии при фронтальном подходе волн

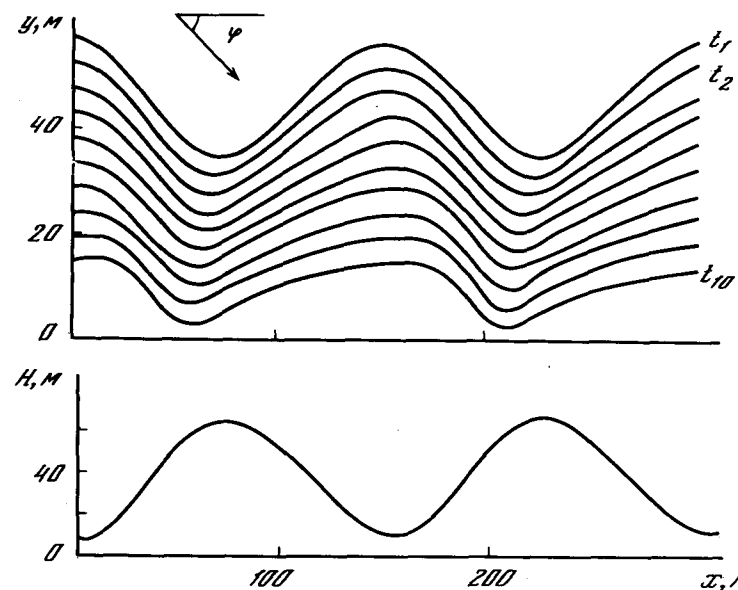
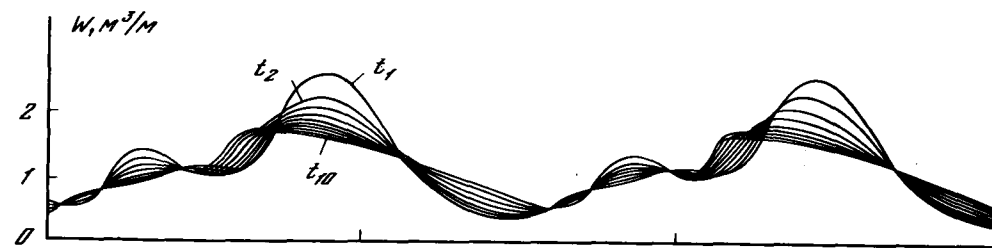


Рис. 3. Перераспределение обломочного материала, развитие береговой линии и форма клифа $H(x)$ при боковом подходе волн

номерное перемещение наносов во время штормов преобладающих направлений), а вторая, N – случайный (случайные движения частичек наносов в разные стороны во время штормов других, нехарактерных направлений). Для расчета детерминированной составляющей расхода потока наносов M предложено довольно много формул, из которых самой простой и наиболее часто применяемой является следующая [4, 5]:

$$(4) \quad M = A \sin 2\psi,$$

где ψ – угол между лучом волны в открытом море и касательной к береговой линии; A – значение максимального расхода (при $\psi = 45^\circ$). Более точная формула для M , учитывающая рефракцию волн, предложена в [6].

В выбранной нами системе координат

$$(5) \quad \psi = \varphi - \arctg y_x,$$

где φ – луч волны в открытом море во время штормов наиболее часто повторяющегося направления.

Вдольбереговые случайные перемещения наносов в конечном итоге способствуют выравниванию вдоль берега объема обломочного материала. Один из возможных вариантов описания этого объективно действующего процесса состоит в

том, чтобы его расход N представить в виде: $N = -cW_x$, где c — коэффициент "выравнивания" объема наносов, аналогичный коэффициенту диффузии в уравнении теплопроводности. С учетом этого, (3) можно записать в виде

$$(6) \quad W_t = aVH - kW + cW_{xx} - M_x + F(x, t).$$

В конечном итоге получена система двух нелинейных дифференциальных уравнений (2) и (6) (с учетом (4) и (5)) с двумя неизвестными u и W , описывающая естественный процесс развития берега в условиях неизменного волнового режима. Техногенное вмешательство человека в этот процесс может быть учтено соответствующими граничными условиями. Например, если в точке $x = x_1$ установлен мол, не пропускающий наносы, то он задается так: при $x = x_1$ $Q = 0$. Волноотбойная стенка, поставленная на участке от x_2 до x_3 задается условием: при $x = [x_2, x_3]$ $u_t = 0$ и т.д. Система уравнений (2), (6) позволяет рассчитывать последствия вмешательства человека в естественные береговые процессы. С ее помощью можно также находить наиболее целесообразные варианты проведения берегоукрепительных мероприятий. В качестве примера на рис. 1 представлена схема развития берега, укрепленного бунами. Параметры абразии принимались характерными для берегов северо-восточного сектора Черного моря: $\epsilon = 10^{-2}$ м³/м; $r = 0,5$ м³/м; $c = 0,46$ м²/год; $k = 0,1$ год⁻¹; $B = 0,026$ м³/год. Расчеты сделаны для следующих условий: $H = 40$ м, $\varphi = 45^\circ$, при $t = 0$ берег прямолинейный ($u = \text{const}$) и $W_0 = 1$ м³/м, искусственная отсыпка гальки на пляж не проводится (в принципе, можно рассчитать эволюцию береговой линии при различных режимах отсыпки обломочного материала). Прогноз сделан с помощью ЦЭВМ на 500 лет.

Для выявления закономерностей развития в голоцене первоначально расчлененного берега, сложенного достаточно прочными породами, сделаны расчеты при следующих условиях. Береговая линия в начальный момент времени задавалась синусоидой с амплитудой 10 м, $H(x)$ — так же синусоидой с амплитудой 25 м. Рассматривались случаи фронтального ($\varphi = 90^\circ$) и бокового ($\varphi = 45^\circ$) подхода волн к берегу. Параметры абразии те же, что и в предыдущем примере. Расчеты сделаны на 3 тыс. лет. На рис. 2, 3 показаны соответствующие кривые через каждые 300 лет.

Расчеты показали следующее. Первоначально расчлененный берег имеет тенденцию к выравниванию — образованию так называемого выровненного абразионного берега, что полностью согласуется в выводами качественной теории этого процесса [7]. Ввиду небольшой скорости абразии (до 10 мм/год) за 3 тыс. лет мысы не срезаны волнами, хотя и были незначительными. Отсюда следует, что современное расчленение берега здесь унаследовано от более ранних стадий его развития.

Южное отделение
Института океанологии им. П.П. Ширшова
Академии наук СССР, Геленджик

Поступило
30 VI 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуйский Ю.Д., Шевченко В.Я. — Геоморфология, 1975, № 4, с. 98–104.
2. Есин Н.В., Савин М.Т., Жилев А.П. Абразионный процесс на морском берегу. М.; Л.: Гидрометеоздат, 1980. 200 с.
3. Есин Н.В. Океанология, 1980, № 1, с. 111–115.
4. Мунк-Петерсен И. В кн.: IV Гидрологическая конф. балтийских стран, 1933, с. 15–25.
5. Кнапс Р.Я. В кн.: Научн. сообщ. Ин-та геологии и географии АН ЛитССР, 1956, т. III, с. 30–40.
6. Попов Б.А. В кн.: Береговая зона моря. Наука, 1981, с. 53–61.
7. Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. Изд-во АН СССР, 1962. 720 с.