

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

---

# ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

1

---

МОСКВА · 1984

## К ТЕОРИИ ЭВОЛЮЦИИ АБРАЗИОННОГО БЕРЕГА

ЕСИН Н. В., ДМИТРИЕВ В. А., МОСКОВКИН В. М.

Одним из важных факторов, влияющих на динамику абразионного берега, является обломочный материал. От его объема, состава и распределения вдоль берега зависят как скорость отступления клифа [3, 10], так и общие закономерности эволюции береговой линии моря [5—7]. В качественной теории абразии миграцией обломочного материала объясняется образование так называемого выровненного абразионного берега [5, 6]. В последние годы удалось установить ряд количественных зависимостей между скоростью отступления клифа  $v$  и объемом обломочного материала на единице длины берега  $W$  [4, 10]. В [3, 4] предложена математическая модель, описывающая в случае плоской задачи динамику взаимосвязи между  $v$  и  $W$  в условиях равномерного относительного повышения уровня моря. По этой модели в настоящей статье сделана оценка устойчивости абразионного процесса и показана возможность построения теории эволюции береговой линии моря.

В статье [4] предложено уравнение баланса обломочного материала на пляже абразионного берега в виде

$$\frac{dW}{dt} = avH - kW, \quad (1)$$

где  $t$  — время;  $a$  — доля пляжеобразующего материала в породах, слагающих берег;  $k$  — коэффициент истираемости этого материала;  $H$  — высота клифа. Размерность  $W$  — м<sup>3</sup>/м;  $k$  — 1/год.

Учитывая данные натурных наблюдений, составлены уравнения, описывающие (в случае плоской задачи) изменение  $W$  во времени. Если берег сложен скальными или полускальными породами, тогда

$$\frac{dW}{dt} = DW - FW^2. \quad (2)$$

Для легкоразрушаемых берегов

$$\frac{dW}{dt} = \frac{abH}{W} - kW. \quad (3)$$

В (2) и (3)  $D = 2 \frac{av'H}{W'} - k$ ;  $F = \frac{av'H}{(W')^2}$ ;  $v'$  — скорость разрушения берега, сложенного прочными породами при наиболее благоприятном для абразии объеме  $W'$  обломочного материала на пляже;  $b$  — некоторый коэффициент, имеющий размерность м<sup>3</sup>/год. Для северо-восточных берегов Черного моря значения входящих в уравнение (2) параметров указаны в [3, 11].

Интересно отметить, что уравнение (2) аналогично уравнению, описывающему эволюцию экосистем [8, 9].

Представляет интерес оценить по моделям (2) и (3) реакцию абразионного процесса на изменение обломочного материала на пляже в результате действия некоторых внешних факторов (например, изъятия

материала из береговой зоны). Методическая основа таких оценок изложена в [1, 2].

Анализ уравнения (3) указывает на большую устойчивость абразии, протекающей на берегах, сложенных глинами, суглинками (и другими легкоразрушаемыми породами) к внешним воздействиям. Иными словами, при изъятии обломочного материала с пляжа его объем через некоторое время восстановится в результате усиления абразии, и процесс возвратится в стадию установившегося режима.

Устойчивость абразии, протекающей на берегах, сложенных прочными породами, возрастает с увеличением  $D$ , т. е. с увеличением  $H$  или уменьшением  $k$ . Когда  $D < 0$ , процесс в стадию установившегося режима не возвращается (абразия на некоторое время прекращается). Отсюда следует, что искусственное изъятие из береговой зоны обломочного материала может здесь на долгие годы существенно снизить темп абразии.

Используя уравнение (2) или (3), можно составить модель развития береговой линии моря. Для перехода к пространственной модели следует учесть в уравнении (1) перемещения обломочного материала вдоль берега. Если ось  $x$  направить вдоль берега, ось  $y$  — перпендикулярно к оси  $x$  в плоскости горизонта в сторону суши и учесть, что  $W = W(x, t)$ , нетрудно получить уравнение баланса в виде

$$\frac{\partial W}{\partial t} = avH - kW - \frac{\partial}{\partial x}(Q), \quad (4)$$

где  $Q$  — расход обломочного материала во вдольбереговом потоке.

Механизм движения гальки в береговой зоне включает в себя две составляющие: случайную (случайные перемещения гальки вдоль берега при штормах различных направлений) и детерминированную (например, перемещение гальки во вдольбереговом потоке наносов, движение гальки с мысов в бухты и т. д.). При разнонаправленных волнениях происходит как бы выравнивание распределения обломочного материала на пляже: из районов, где его больше, он перемещается туда, где его меньше. В первом приближении данный механизм аналогичен механизму диффузии. На основании этих соображений расход потока наносов можно представить в виде

$$Q = -C \frac{\partial W}{\partial x} + Q_{\text{дет}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{дет}}$  — детерминированная составляющая расхода. Какая из указанных составляющих преобладает, зависит от конкретной ситуации. Например, в условиях чередующихся разнонаправленных волнений будет преобладать первая, однонаправленных — вторая.

Диффузионный член  $-C \frac{\partial W}{\partial x}$  введен в уравнение (5) для того, чтобы учесть результат действия штормов противоположных (относительно нормали к береговой линии) направлений, перемещающих наносы последовательно в противоположные стороны. В принципе, его можно не вводить в уравнение, но тогда для оценки величины отступления берега за год необходимо определить его отступление за время каждого (в этом году) из штормов в той последовательности, в которой они происходили. Это создает дополнительные сложности в расчетах и нецелесообразно, поскольку описываемые процессы протекают в течение тысяч, десятков тысяч лет и более.

Предложенный вариант описания процесса выравнивания значений  $W$  вдоль берега не единственный. Однако этот способ наиболее прост и имеет простую физическую интерпретацию.

Рассмотрим процесс эволюции береговой линии моря при отсутствии вдольберегового потока наносов ( $Q=0$ ). В этом случае из уравнений (2) и (3) получим

$$\frac{\partial W}{\partial t} = DW - FW^2 + C \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{abH}{W} - kW + C \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (7)$$

Эволюция береговой линии моря определяется соответственно уравнениями [4]

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{v'W}{W'} \left( 2 - \frac{W}{W'} \right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = bW^{-1}, \quad (9)$$

в которых  $y=f(x, t)$  — береговая линия.

Система уравнений (6), (8) и (7), (9) решается численно при указанных выше параметрах абразии. Принималось, что в начальный момент времени  $W=W_0=1 \text{ м}^3/\text{м}$  и что на границах рассматриваемого участка береговой зоны  $Q=0$  (т. е. он изолирован от соседних мысами или

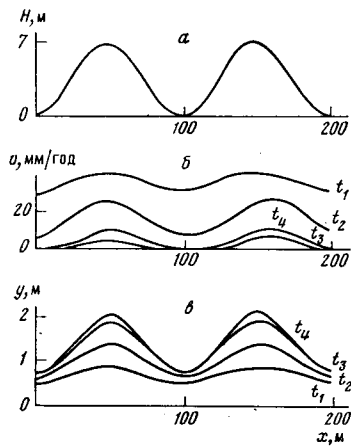


Рис. 1. Эволюция береговой линии по модели (6), (8) через каждые 100 лет

*a* — вертикальный разрез клифа; *b* — распределение вдоль берега скорости отступления клифа  $v$  и ее изменение во времени; *в* — последовательные положения береговой линии

гидротехническими сооружениями). Береговая линия в начальный момент времени считалась прямолинейной, а клиф — состоящим из двух «гор», разделенных «долиной». Вопрос об оценке коэффициента  $C$  требует особого обсуждения. На основании ориентировочных оценок результатов натурных наблюдений на северо-восточных берегах Черного моря мы принимали его равным  $0,02 \text{ м}^2/\text{год}$ .

Расчет по модели (6), (8) показал возможность двух типичных случаев эволюции береговой линии моря. Так, если максимальная высота клифа  $H$  меньше предельной ( $H_{пр}$ ), при которой  $D=0$ , абразия со временем затухает (рис. 1). При этом зона абразионного воздействия обломочного материала уменьшается и сосредотачивается против вершин упоминавшихся «гор». Здесь формируются береговые дуги, а на участке «долины» — мыс. Первоначально прямолинейный берег становится расчлененным.

Когда максимальная высота клифа намного больше оптимального значения  $H=2H_{пр}$  (у нас  $H_{пр}=8 \text{ м}$ ), берег развивается по схеме, показанной на рис. 2. Здесь центральная часть «горы» отступает со скоростью, несколько меньшей, чем ее периферия. По этой причине в центральной части береговая линия со временем стремится стать прямолинейной, на краевых участках формируются небольшие бухточки, а в районе «долины» формируется мыс. В целом рассмотренная модель показывает, что у первоначально прямолинейного берега с течением времени образуются отмельные мысы и приглубые береговые дуги. Это вполне закономерный процесс, поскольку в условиях переменной высоты клифа на различных участках берега возникают неодинаковые условия абразии.

На северо-восточном побережье Черного моря можно найти немало примеров эволюции береговой линии в соответствии с каждой из указанных схем. Так, к северу от г. Геленджика берег расчленен на отдель-

ные изолированные бухточки, вдающиеся в сушу на десятки метров. Долины здесь опускаются почти до уровня моря. Высота клифа вдоль берега изменяется от нескольких до десятков метров, причем углы наклона рельефа суши в сторону долин ( $\arctg dH/dx$ ) достигают  $60 \div 70^\circ$ . Пляж в основном сконцентрирован в центре бухточек. В этом районе проводились натурные наблюдения за абразией в течение 5 лет [3]. Основной вывод, следующий из полученного материала, состоит в том, что более интенсивно берег разрушается в центре бухточек. Так, в некоторые годы скорости истирания пород на мысах были меньше 1, а в бухтах — от 3 до 10 мм/год. Натурные наблюдения показали, таким образом, что береговая линия здесь не имеет тенденции к выравниванию из-

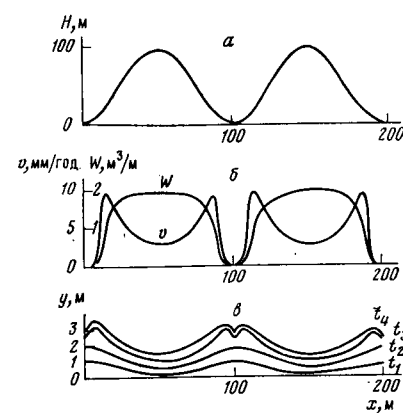


Рис. 2

Рис. 2. Эволюция береговой линии по модели (6), (8) через каждые 100 лет *a, в* — см. рис. 1; *б* — распределение вдоль берега скорости отступления клифа  $v$  и объема обломочного материала  $W$  в стадии установившегося режима

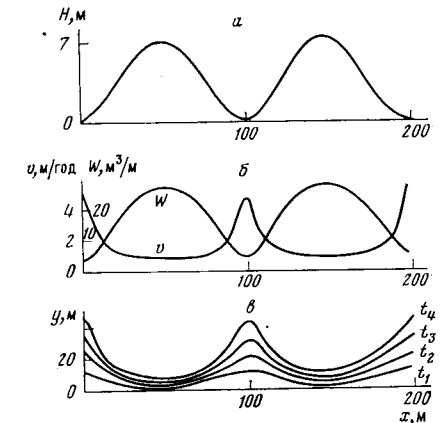


Рис. 3

Рис. 3. Эволюция береговой линии по модели (7), (9) через каждые 5 лет *a, в* — см. рис. 1; *б* — см. рис. 2

за очень большого расчленения рельефа суши эрозионными процессами. В целом на этом участке берег развивается по схеме, показанной на рис. 1.

К югу от г. Геленджика берег образует вогнутую в сторону суши дугу. Расстояние между мысами, ограничивающими бухту, составляет примерно 10 км. С севера на юг высота клифа вначале возрастает до 60 м, затем уменьшается до нуля. Скорости абразии здесь максимальные на участках, где высота клифа составляет  $10 \div 20 \text{ м}$ . Этим участкам соответствуют незначительные бухты. На данном участке берег развивается по схеме, показанной на рис. 2.

Несколько иначе происходит развитие абразионного берега, сложенного легко разрушаемыми породами (см. (7), (9)). Здесь скорость его отступления уменьшается с увеличением высоты клифа. Поэтому берег развивается по классической схеме: у наиболее высоких участков клифа формируются приглубые мысы, а против долин — отмельные бухточки (рис. 3).

В заключение отметим, что чем интенсивнее вдольбереговые случайные миграции обломочного материала, тем меньше значение  $dv/dx$ , соответственно и  $v$  меньше зависит от высоты клифа в данной точке. При очень интенсивном вдольбереговом перемещении обломочного материала (т. е. при большом значении коэффициента  $C$ )  $v$  зависит уже не от высоты клифа в данной точке, а от средней высоты клифа на изолированном участке берега. Это один из факторов, благодаря которому при общем отступании выровненного абразионного берега сохраняется его очертание.

## Литература

1. Вейцель А. Д., Фрейдлин М. И. О малых случайных возмущениях динамических систем.— Успехи матем. наук, 1970, т. XXV, вып. 1 (151), с. 3—55.
2. Венцель А. Д., Фрейдлин М. И. Устойчивость при малых возмущениях.— Теория вероятности и ее применение, 1972, т. XVII, № 2, с. 281—295.
3. Есин Н. В., Савин М. Т., Жиляев А. П. Абразионный процесс на морском берегу. Л.: Гидрометеонздат, 1980. 200 с.
4. Есин Н. В. О роли обломочного материала в абразионном процессе.— Океанология, 1980, т. 20, вып. 1, с. 111—115.
5. Зенкович В. П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 520 с.
6. Леонтьев О. К., Никифоров Л. Г., Сафьянов Г. А. Геоморфология морских берегов, М.: Изд-во МГУ, 1975. 336 с.
7. Попов Б. А. Приближенный анализ формы слабоогнутых аккумулятивных береговых дуг.— В кн.: Перемещение наносов и генезис россыпей тяжелых минералов в береговой зоне моря. М.: Наука, 1965, с. 167—187.
8. Светлосанов В. А. О стабильности экосистем.— Вестник МГУ. Сер. геогр., 1976, № 4, с. 12—25.
9. Светлосанов В. А. Трудности и успехи в исследованиях устойчивости гео- и экосистем.— Вестник МГУ. Сер. геогр., 1977, № 4, с. 13—19.
10. Шуйский Ю. Д. Механизм развития абразионного профиля в береговой зоне моря.— Зап. Болгар. геол. о-ва, 1976, т. 37, кн. 3, с. 112—115.
11. Шуйский Ю. Д. Исследование процессов истирания наносов в береговой зоне морей.— В кн.: Строение и вопросы корреляции четвертичных отложений Украины. Киев: Наукова думка, 1981, с. 72—92.

ЮО ИО АН СССР  
ВНИИВО

Поступила в редакцию  
1.II.1982