

## НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.435.3

АРТЮХИН Ю. В.

РАВНОВЕСНЫЕ БЕРЕГОВЫЕ ФОРМЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ НАРУШЕНИЙ  
СТАБИЛЬНОСТИ ПОБЕРЕЖЬЯ

Замечательными морфологическими образованиями многих морей Мирового океана являются равновесные береговые формы. К ним могут быть отнесены как дуги побережий правильной (симметричной) формы различной степени вогнутости, так и асимметричные образования типа «логарифмической спирали». По мнению советских ученых, наличие этих форм свидетельствует о том, что побережье достигло состояния динамического равновесия [1], при котором береговая линия может выдвигаться или отступать под воздействием моря, но все время остается параллельной самой себе, вследствие чего очертания берега не меняются [1, 2]. Это условие выдерживается при постоянстве вдольберегового расхода наносов на каждую единицу длины береговой линии по всему ее периметру, т. е. [2]

$$\frac{dq}{dl} = \text{const},$$

где  $dq$  — элементарный расход наносов,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $dl$  — элемент длины дуги.

П. Ле Блонд [3] считает это состояние таким, при котором ни очертания пляжа, ни подводный склон, ни распределение крупности наносов не изменяются во времени, т. е. пляж достиг полной гармонии с преобладающим волновым полем. Но, по-видимому, такое положение справедливо лишь для закрытых систем, не теряющих вещество и энергию, которые в природе встречаются редко.

Б. А. Попов одним из первых начал аналитическое исследование таких равновесных береговых форм. Сначала он провел анализ слабовогнутой (стрела прогиба меньше ширины береговой зоны), а затем и сильновогнутой (стрела прогиба больше ширины береговой зоны) аккумулятивной береговой дуги [2, 4]. Оказалось, что в первом случае дуга описывается уравнением параболы, симметричной относительно оси  $y$ :

$$y = \frac{C}{4K\mathcal{E}_0} \frac{\sin \alpha_\delta}{\sin \alpha_0 \cos^2 \alpha_\delta} x^2,$$

где  $\mathcal{E}_0$  — поток волновой энергии на единицу длины фронта волны глубоководья;  $C$  — постоянная для данной дуги величина;  $\alpha_\delta$  — угол подхода волн к берегу;  $K$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств пляжевого материала;  $\alpha_0$  — угол подхода волн глубоководья.

Во втором случае форме береговой дуги достаточно строго соответствует окружность. Ее радиус  $R$  определяется углом подхода волн открытого моря  $\alpha_0$  и относительной величиной потоков энергии косоподходящих и нормальных к берегу волнений  $\eta$ :

$$R = \frac{\eta + 2 \sin \alpha_0}{\eta}.$$

Если параметры стрелы прогиба и ширина береговой зоны одного порядка, то равновесная форма такого берега описывается окружностью

радиусом  $R$ :

$$R = \frac{3,6K\mathcal{E}_0 \left(\frac{h_0}{\lambda_0}\right)^{\frac{2}{5}}}{C_0},$$

где  $\frac{h_0}{\lambda_0}$  — крутизна волн глубоководья;  $\mathcal{E}_0$  — поток энергии волн глубоководья;  $C_0$  — постоянная  $C$  при угле  $\alpha_0 = 0^\circ$ .

Ю. Н. Сокольников [5], изучая на пространственных размываемых моделях в волновом бассейне динамику берега с прерывистым креплением, установил закономерности эволюции возникающей серии абразионных бухт. Во всех опытах их форма менялась от полуэллипса малого эксцентриситета до полуокружности. Оказалось, что она не зависела от параметров волн, угла их подхода к берегу, начального уклона от мели и положения в пределах зоны насыщения.

Предельным состоянием развития площади бухт Ю. Н. Сокольников считает полуокружность: максимальная глубина вреза бухт равна половине расстояния между осями  $B$  и  $D$  блокирующих элементов (мысов)  $\frac{B+D}{2}$ , а предельная их площадь  $F_{\text{пр}}$  в этом состоянии

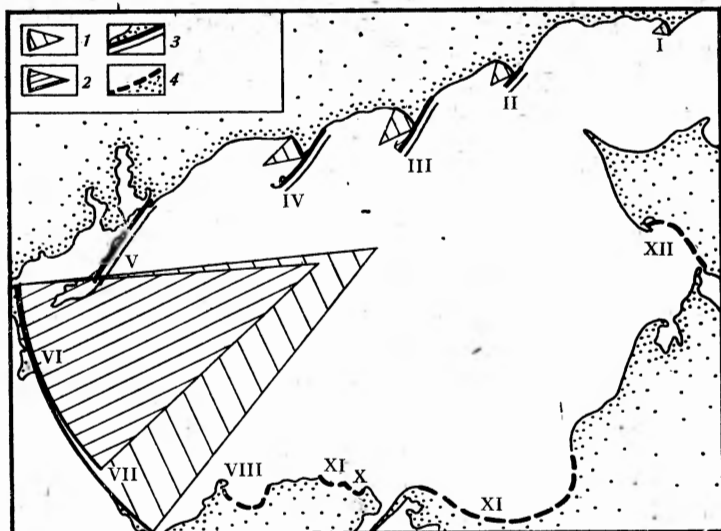
$$F_{\text{пр}} \approx 0,4 (B+D)^2.$$

Резкое уменьшение вдольберегового перемещения наносов в пределах бухт после достижения ими полуциркульного очертания явилось, по его мнению, убедительным доказательством прекращения пространственного развития останцового бухтового берега. В качестве природного аналога подобных равновесных бухт Ю. Н. Сокольников приводит пример бухт Феодосийской, Ярылгачской и Одесской на Черном море, Промпер-Вик и Прорер-Вик на Балтийском, Казантипской на Азовском море [6].

Р. Сильвестер [7] считает, что при косом подходе волн к берегу с прерывистым креплением более устойчива форма логарифмической спирали. Подобный тип равновесных форм Р. Сильвестер экспериментально исследовал еще в 1962 г., назвав полученные асимметричные дуги полусердиями [8]. Несколько позже В. Яссо выяснил, что они хорошо описываются уравнением логарифмической спирали [9]. Спиралевидная форма таких берегов определялась рефракцией подходящих к берегу волн и их дифракцией у мыса.

Вообще роль дифракции в формировании асимметричных береговых абразионных дуг весьма велика. На это, например, указывают данные специальных экспериментальных исследований Д. Роберта на моделях бухт, ограниченных мысами или волноломами [10]. В природе также достаточно отчетливо проявляется влияние дифракции на формирование асимметричных бухт. Детальный анализ не позволяет согласиться с тем, что, например, Казантипская бухта (южный берег Азовского моря) имеет форму дуги окружности. В большей степени ей соответствует логарифмическая спираль, вершина которой смещена к мысу, закрывающему бухту от преобладающих северо-восточных волнений. Еще более четко это влияние дифракции проявляется в форме расположенных по соседству с Казантипской бухт Булганак и Рифов (рисунок). Близка к логарифмической спирали береговая линия вершины Ясенского залива. Дугам окружности в Азовском море соответствуют западные берега ряда кос «азовского типа» (рисунок).

Результаты моделирования К. Ри и П. Комара [11] показали, что если рассматривать участки побережья в виде закрытой системы (не имеющей потерь вещества), то в них достигается совершенное равновесие. Береговая линия таких участков по всей длине повторяет форму волнового фронта. При открытой системе, когда наносы уходят через открытый конец береговой зоны (лишенный мыса), размыв берега прогрессирует. При этом (что очень важно) вид кривой берега сохраняется. Указанными авторами предложена математическая модель конфи-



Равновесные береговые формы Азовского моря

1 — дуги окружностей; 2 — дуга окружности Арабатской стрелки, проведенная с учетом влияния Арабатской бани; 3 — «выпуклые» логарифмические спирали; 4 — «вогнутые» логарифмические спирали. Косы: I — Кривая, II — Белосарайская, III — Бердянская, IV — Обиточная, V — Федотова-Бирючий остров, VI — Арабатская стрелка, VII — Арабатская банка. Заливы и бухты: VIII — Казантипский, IX — Рифов, X — Булганак, XI — Темрюкский, XII — Ясенский

гурации береговой линии пляжа, аппроксимируемой логарифмической спиралью.

Иной подход предложил П. Ле Блонд [3], который разработал синтетическую спираль для описания пляжа Хафмун-Бей (Калифорния) на основе использования уравнений, учитывающих эффекты дифракции и рефракции, вызываемые мысом и подводным склоном, соотношения между уклоном пляжа, потоком волновой энергии и крупностью наносов.

Таким образом, береговые линии многих участков морских побережий обладают замечательными свойствами, важнейшими среди которых можно считать консервативность очертаний береговой линии и прилежащих изобат во времени, а иногда и в пространстве, а также закономерный характер сопряженного развития поперечного профиля и плана этих берегов [12]. Многие вопросы теории образования равновесных береговых форм разработаны недостаточно, а методы их расчета еще далеки от совершенства. Но даже на этом этапе они представляются весьма важным средством оценки антропогенных нарушений режима морских берегов, достигших равновесного состояния. На эту возможность указывал Б. А. Попов [2, с. 126] при анализе возможных изменений режима Абу-Кирского залива после создания Асуанской плотины на Ниле. Это важно также вследствие широкой распространенности дуг и спиралей на побережье Мирового океана. Помимо отмеченных в Черном море это бухты Сухумская, Батумская [1], Пипундская, Караджинская, пересыпь Сасыкского озера, бухты Самсун, Эрегли (Турция), Констанцы (Румыния). Много подобных форм в дальневосточных морях — в зал. Анива (Сахалин), на о. Итуруп, в Анадырском заливе [1], береговой зоне Японских островов (бухты Утиура, Хакодате, Шимода, Муцу и др.), Кореи (у мыса Сувондап). Часто встречаются равновесные береговые линии и в Австралии (пляжи полуостровов Янгхасбанд, Идел-Ленд, Эйти-Майл-Бич), Африке (заливы Абу-Кир [4, 12], Хаммамет, бухты Алгоа, Фолс-Бей, дуга мыса Альмади), Америке (дуги о. Норт-Айленд, лагуны Эскуаймолт, пр. Хамбели и др.). Берега Европейского континента также изобилуют подобными формами: заливы Россили-Бей, Пул, пляж Чезил-Бич [13], дуга побережья Нидерландов между городами Гаага и Берген-ан-Зе. Это

лишь небольшой перечень из всего многообразия подобных форм побережья Мирового океана.

Если побережье развивается так, что нет ни «чистых» размывов, ни «чистой» аккумуляции (закрытая литодинамическая система), то любые нарушения литодинамического режима немедленно приведут к существенной перестройке морфологии побережья. В другом случае — когда береговая линия и изобаты смещаются в пространстве, сохраняя свои очертания, антропогенные нарушения также могут быть выявлены достаточно уверенно. Надежность выделения антропогенных составляющих повышается благодаря тому, что анализируются не только линии уреза, но и изобаты, базовые поперечные профили. Следовательно, в основе идеи лежит твердо установленная закономерность длительного сохранения плана берега независимо от сезонных и годовых вариаций литодинамического режима.

Антропогенное нарушение неизбежно проявится в конфигурации береговой линии, изобат, строении подводного склона, ибо в отличие от природных флюктуаций оно обладает способностью репродуцировать свое воздействие в течение длительного срока. Это характерно не только для сооружений, вызывающих негативные деформации берега, но и для тех видов антропогенной деятельности, которые сопровождаются значительными преобразованиями морфологии и баланса наносов береговой зоны. Так, например, последствия промышленного изъятия 50 тыс. т песка с участка западного берега дистали косы Бирючий остров сказывались в режиме его подводного склона и пляжа в течение последующих 10 лет.

Для выявления антропогенных нарушений, по-видимому, целесообразно использовать графический метод исследования равновесных форм. Анализ картографических материалов за длительный период позволит убедиться, сохраняет ли данный участок побережья свою форму. Полевые исследования выявят характер развития поперечного профиля. В случае, когда побережье близко к состоянию динамического равновесия, можно наметить вид уравнения, описывающего данную линию уреза. Путем набора точек на кривой в условной системе координат и последующего их анализа на ЭВМ мы получим уравнение береговой линии. Допустим, это окружность. Тогда на крупномасштабной карте подбирается такое положение центра, при котором дуга окружности максимально совпадает с береговой линией. Несколько более сложна, но также возможна операция подбора центра и параметров «логарифмической спирали» [13]. В результате построений мы получим контрольную линию с серией профилей, которые позволят обоснованно судить о характере пространственных деформаций равновесных участков побережья. Безусловно эффективный контроль возможен только в рамках постоянно действующей Береговой службы.

Характерными признаками антропогенных нарушений режима равновесных береговых форм могут быть аномальное распределение вдоль периметра берега величин расхода наносов и, как следствие, возникновение деформаций берега — краевых размывов или, наоборот, выдвинутый линии уреза, перестройка поперечного профиля, уменьшение количества подводных валов, изменение уклонов, относительное увеличение крупности наносов. Так, гидротехническое строительство на западном побережье Бердянской косы привело к нарушению ранее равновесной его формы (рисунок). Это можно показать, например, на изменении извилистости изобат на участке (отношение общей длины изобаты с учетом всех изгибов к длине прямой, соединяющей ее начало и конец). В 1833 г. соотношение извилистости линии уреза, изобат 3, 4 и 5 м составляло 0,97 : 0,98 : 1,00 : 0,98, т. е. изобаты располагались почти параллельно урезу. В 1898 г. это соотношение уже равнялось 0,97 : 1,11 : 1,10 : 1,31, а к 1974 г. еще более возросло: 1,00 : 1,13 : 2,04 : 1,4. Эти данные наглядно показывают направленный характер перестройки ранее равновесной дуги.

С помощью вписываемой в береговой контур контрольной линии могут быть выявлены антропогенные нарушения, приводящие к изменениям морфологии, по крайней мере вдвое большим, чем погрешности совмещения естественной и контрольной линий. Анализ материалов по Азовскому морю показывает, что на некоторых участках его побережья можно зарегистрировать деформации плана береговой линии в пределах  $\pm 30 - 40$  м. Реальные же возмущения, вносимые хозяйственными и гидротехническими сооружениями, в отдельных случаях могут достигать  $\pm 100 - 150$  м.

Контроль за положением равновесной береговой линии эффективен лишь на участках с высокой степенью однородности геологической структуры, пляжевого материала и др. В условиях Азовского моря очень важна равномерность в поступлении биогенного материала. Так, расчеты по Арабатской стрелке показали; что ее дуга в общем виде неплохо удовлетворяет окружности с  $R=138$  км. Но анализ крупномасштабных материалов показал, что необходим учет Арабатской банки — биоценоза моллюсков кардиум. В зоне поступления раковинного материала контур этой формы испытал деформацию. Следовательно, может контролироваться только та ее часть, которая находится вне зоны «биогенного возмущения», к северу от Арабатской банки (рисунок).

Анализ карты побережья Нидерландов между устьем р. Ауде-Маас и г. Берген-ан-Зе м-ба 1 : 500 000 позволил установить, что его контур хорошо соответствует дуге окружности радиусом 111,5 км. Погрешность совмещения береговой линии и дуги окружности не превышает 50 м. Лишь на участке побережья г. Гаага протяженностью 3 км «невязка» контуров составляет +1,3 км. Есть основания полагать, что искажение равновесного контура в этом районе является следствием намыва городских территорий Гааги [14] и строительства ограждающего мола на северном берегу устья р. Ауде-Маас.

Использование теории равновесных береговых форм позволяет также с несколько иных позиций объяснить причины негативных преобразований бухты Саттахип (в северной части Сиамского залива, Таиланд) [15]. В ее пределах можно выделить две дуги окружности, одна из которых расположена в пределах развивающегося глубоководного порта. Создание ряда гидротехнических сооружений в пределах порта, на островах Ко-Му и Ко-Нанг-Рам, на северном и южном мысах бухты Саттахип привело к нарушению сложившихся в естественных условиях схем рефракции и дифракции волновых фронтов, перемещения наносов. В результате резко активизировался процесс приспосабливания литодинамического режима береговых дуг к новым волновым условиям. Следовательно, речь идет об антропогенном нарушении режима всей береговой системы бухты, а не только о локальных перестройках берега, вызванных гидротехническими сооружениями. Вероятно, именно поэтому столь широко проявились заиление акватории бухты, рост подводных баров в проливах ряда мелких островов и другие негативные явления, не наблюдавшиеся в естественных условиях.

Таким образом, некоторые равновесные участки побережий обладают замечательными свойствами, позволяющими с большой надежностью прогнозировать их развитие и выявлять антропогенные нарушения. Равновесные формы таких берегов уже на нынешнем этапе изучения могут стать эффективным инструментом контроля за развитием обширных участков морских побережий. Только в Азовском море таким способом можно обеспечить контроль за стабильностью 15—17% протяженности всей береговой линии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Зенкович В. П.* Основы учения о развитии морских берегов М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
2. *Попов Б. А.* Равновесная форма сильновогнутой аккумулятивной береговой дуги.— В кн.: Исследования гидродинамических и морфодинамических процессов береговой зоны моря. М.: Наука, 1966, с. 112.

3. *Le Blond P. H.* An explanation of the logarithmic spiral plan shape of headland-bay beaches. — J. Sedim. Petrol., 1979, v. 49, № 4, p. 1093.
4. *Попов Б. А.* Приближенный анализ формы слабовогнутых аккумулятивных береговых дуг. — В кн.: Перемещение наносов и генезис россыпей тяжелых минералов в береговой зоне моря. М.: Наука, 1965, с. 167.
5. *Сокольников Ю. Н.* Инженерная морфодинамика берегов и ее приложения. Киев: Наук. думка, 1976. 227 с.
6. *Сокольников Ю. Н.* Отторжение акваторий в прибрежной зоне. Киев: Наук. думка, 1979. 240 с.
7. *Silvester R.* Some facts and fancies about beach erosion. — Proc 16th Coast. Engng. Conf. Hamburg, 1978, V. 2, N. Y. 1979, p. 1888.
8. *Silvester R.* Sediment movement around the coastlines of the world. — Conf. Civic Problems, Inst. Civ. Engng, 1969, № 14, p. 16.
9. *Yasso W. E.* Plan geometry of headland-bay beaches. — J. Geology, 1965, v. 73, p. 702.
10. *Robert D. C.* Diffraction calculation of shoreline planform. — Proc. 16th Coast. Engng. Conf. Hamburg, 1978, V. 2, N. Y.: 1979, p. 1903.
11. *Rea C. C., Komar P. D.* Computer simulation models of a hooked beach shoreline configuration. — J. Sedim. Petrol., 1975, v. 45, № 4, p. 866.
12. *Попов Б. А.* Равновесная береговая линия и защита берегов. — В кн.: Инженерно-географические проблемы проектирования и эксплуатации крупных равнинных водохранилищ. М.: Наука, 1972, с. 57.
13. *Cuchlaine A. M. K.* Coastal accretion and erosion: constructive and destructive wave action. — Quad. Ric. Sci., 1976, № 94, p. 95.
14. *Д. Джонс.* Рельеф, созданный человеком. — В кн.: Неспokoйный ландшафт. М.: Мир, 1981, с. 171.
15. *Сукрунгреунг У.* Сооружения, построенные человеком, меняют облик залива Сатта-хип. — В кн.: Материалы XXIII Международного географического конгресса. Т. 3. География океана. М., 1976, с. 31.

Ростовский государственный университет

Поступила в редакцию 2.XI.1982

## SEA COASTS EQUILIBRIUM FORMS USED FOR IDENTIFICATION OF MAN-INDUCED INSTABILITIES OF SHORE

ARTYUKHIN Yu. V.

### Summary

The paper discusses some theses of coast equilibrium forms and describes various equilibrium forms. Most often the sea coast develops either arcs of various curvature or asymmetrical formations such as logarithmical spiral, both types being remarkable for their persistence through time, sometimes without lateral migration. These characteristics permit to forecast their evolution and to identify man-induced disturbances.

УДК 551.435.12

ЛОДИНА Ф. В., САВЦОВА Т. М.

## СОВРЕМЕННЫЙ РУСЛОВОЙ АЛЛЮВИЙ И ОСОБЕННОСТИ ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ТИПАМ РУСЛА НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ ВИЛЮЯ

Состав и распределение руслообразующих наносов — важнейшие характеристики, необходимые при русловом анализе в целях обоснования комплекса мероприятий по регулированию речных русел. Познание закономерностей распределения современного руслового аллювия и выявление роли факторов, влияющих на него позволяет оценить процесс накопления аллювиальных толщ, что необходимо для решения различных задач при палеогеографических реконструкциях, анализе условий формирования аллювиальных россыпей и т. д.

Из всех звеньев гидрографической сети наиболее хорошо изучен современный русловой аллювий равнинных рек (Е. В. Шанцер, Г. И. Шамоу, А. А. Лазаренко, Б. С. Лунев и др.). Каждый из исследователей, изучая современный русловой аллювий в различных аспектах (его фациальное строение, инженерно-геологические свойства, гранулометрический и минералогический состав), внес существенный вклад