

An aerial photograph of a coastal landscape, showing a river flowing into a bay. The land is light brown and textured, with a network of smaller streams and channels. The water in the bay is dark blue. The photograph is partially obscured by a dark blue shape on the right side of the cover.

Г.А.Сафьянов
ГЕОМОРФОЛОГИЯ
МОРСКИХ
БЕРЕГОВ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. М.В.ЛОМОНОСОВА

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Г.А.САФЬЯНОВ

ГЕОМОРФОЛОГИЯ МОРСКИХ БЕРЕГОВ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением университетов
(секция географии) в качестве учебника для географических факультетов
университетов по специальности 11.00.04.
“геоморфология и эволюционная география”*

МОСКВА
1996

Учебное пособие посвящено геоморфологии морских берегов - актуальной отрасли естествознания, предмет которой - рельеф береговой зоны и побережий океана - продукт взаимодействия литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы. Во вводных разделах кратко рассмотрены предмет, содержание и методы геоморфологии морских берегов. В гидродинамической части содержатся сведения о волнении, прибойном потоке, течениях, длинных волнах и приливах, необходимые для понимания основных закономерностей формирования рельефа береговой зоны океана. Значительное внимание уделено характеристике литодинамических процессов, закономерностям поперечного и продольного перемещения наносов. Геоморфологическая часть включает описание абразионных и аккумулятивных форм рельефа морских берегов, их морфодинамики и геоморфологических комплексов. Рассмотрены некоторые прикладные проблемы геоморфологии морских берегов, обосновывается важнейшая роль рельефа как биопродукционного фактора береговой зоны и необходимость синтеза многоотраслевых знаний о природе береговой зоны моря в целях оптимизации взаимодействия природы и человека.

Рецензенты:

доктор географических наук Ю.С. Долотов,
доктор географических наук Р.Д. Косьян

Печатается по решению Ученого совета географического факультета
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Изготовление оригинал-макета - А.Г. Сафьянов

Геннадий Александрович Сафьянов

ГЕОМОРФОЛОГИЯ МОРСКИХ БЕРЕГОВ

© Г.А. Сафьянов, 1996

ПРЕДИСЛОВИЕ

После выхода в свет последнего учебного пособия по геоморфологии морских берегов (Леонтьев, Никифоров, Сафьянов, 1975) минуло 20 лет. Прошедшее время характеризовалось, с одной стороны, значительной дифференциацией знаний в отдельных разделах геоморфологии морских берегов, при которой стало затруднительно понимать друг друга даже специалистам, работающим в близких областях, а с другой стороны, наблюдались явные тенденции к синтезу знаний, поскольку на практике обнаружилась недостаточность узко специализированных подходов к ряду проблем геоморфологии морских берегов.

Последние десятилетия явились временем значительных достижений в области экспериментального исследования рельефообразующих процессов в береговой зоне моря, появления оригинальных теоретических разработок. Между тем, резко возрос и практический интерес к берегам как сфере многоцелевого использования. Особое место в решении практических задач заняли проблемы укрепления берегов от размыва, принявшие для ряда прибрежных стран характер проблем национальной безопасности. Дополнительным стимулом для отечественных прибрежно-морских исследований послужила проблема устойчивости берегов Каспийского моря, уровень которого за последние два десятка лет поднялся на 2 м. Те же события усилили интерес к берегам со стороны правительственных инстанций и привели к созданию организационных структур, призванных решать возникшие актуальные задачи. В них пришли в значительной мере специалисты, не имеющие опыта работы на берегах, не в полной мере осведомленные о достижениях геоморфологии морских берегов. Автор надеется, что данная работа окажется полезной не только студентам, но специалистам, связанным в своей деятельности с разнообразными вопросами освоения морских побережий, а также геологам и геоморфологам, занимающимся вопросами палеогеографии, изучением древних береговых линий и комплексов рыхлых отложений прибрежно-морского происхождения.

Автор длительное время общался с выдающимися отечественными исследователями геоморфологии и динамики морских берегов В.П.Зенковичем, О.К.Леонтьевым, В.В.Лонгиновым и с признательностью вспоминает их неоценимую помощь на разных этапах своего профессионального развития.

Эта книга готовилась к печати в исключительно сложных условиях финансового, технического и морально-психического характера. Без дружеского участия моих коллег по кафедре геоморфологии, географическому факультету и ответственных лиц озабоченных практикой укрепления морских берегов России, издание

учебного пособия было бы невозможно. Я благодарен за разнообразную поддержку декану географического факультета МГУ профессору Н.С. Касимову, заместителю декана географического факультета МГУ В.П. Бурову, генеральному директору НПО “Дагестанберегозащита” В.О. Мусаеву, заместителю генерального директора СНПО “Краснодарберегозащита” В.М. Пешкову, И.А. Лабутиной - за предоставление ряда содержательных иллюстраций, Н.А. Воробьевой и А.Г. Сафьянову - за помощь в подготовке рукописи к печати.

Считаю своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам кафедры геоморфологии географического факультета Московского университета, способствовавшим выходу этой книги, в особенности Е.И.Игнатову и Л.М.Шипиловой.

Океан представляет собой систему, явление в определенных границах. И в конце концов эти границы могут оказаться более интересными, чем само явление.

Р.Хорн

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие интереса к исследованию морских берегов исторически связано с осознанием огромной роли морей в становлении и развитии России. В начале XVIII века по инициативе Петра I были предприняты грандиозные даже по современным масштабам предприятия, имеющие целью изучение берегов для навигации, составления лоций и морских карт. Так возникли Великая Северная экспедиция, экспедиции Беринга и многих других наших соотечественников, маршруты которых отмечены их именами на географических картах огромных пространств от Белого моря до Аляски и Калифорнии. Этот прикладной гидрографический аспект исследования до сих пор сохраняет значение для нашей преимущественно североокеанской и тихоокеанской страны. Между тем всегда в этих исследованиях проявлялся и их фундаментальный энциклопедический характер. Неслучайно поэтому русские имели приоритет в изучении берегов арктических морей и берегов Антарктиды.

Великий русский ученый М.В.Ломоносов - помор по месту своего рождения пророчески писал 230 лет тому назад: ... " Российское могущество прирастать будет Сибирью и Северным океаном".

Тесная связь с решением практических вопросов характеризует и последующее развитие и формирование отрасли науки о морских берегах. В 1861 г. в России появляется первый курс лекций по морским сооружениям, прочитанный М.Н.Герсевановым в Инженерной академии в Петербурге. С 1929 г. изучение берегов было начато под руководством В.П.Кальянова в Государственном океанографическом институте, а в 1937 г. по инициативе Б.Ф.Добрынина при Географическом факультете Московского университета создается комиссия по изучению морских побережий, которая активно работала до начала Великой Отечественной войны, объединив вокруг себя широкий круг научных работников и инженеров.

Важным этапом в развитии науки о морских берегах явился выход в 1946 г. книги В.П.Зенковича "Динамика и морфология

морских берегов”, которую характеризует широта подхода к решению задач, стройность изложения, единство и последовательность основных концепций.

Прикладные вопросы динамики морских берегов применительно к задачам портостроительства и проектирования и эксплуатации прибрежно-морских гидротехнических сооружений рассмотрены в работах П.К.Божича и Н.Н.Джунковского (1949).

В 50-е годы нашего века появляется ряд работ В.В.Лонгинова, экспериментальные исследования под руководством которого заложили фундамент наших знаний о динамике морских берегов, и завершены выходом его монографии в 1963 г.

С 50-х годов появляются учебные пособия по геоморфологии морских берегов (Леонтьев, 1955, 1961; Леонтьев и др., 1975).

Настоящий размах исследований морских берегов в нашей стране, оценку новейших достижений зарубежной науки отразила монография В.П.Зенковича (1962), удостоенная Государственной премии. С этого времени наука о морских берегах в нашей стране выходит на передовые позиции в международном плане, а В.П.Зенкович на длительное время возглавил Международную комиссию по исследованию морских берегов.

Появляется ряд работ регионального кадастрового характера, посвященных описанию берегов нашей страны, - Черного и Азовского морей (В.П.Зенкович), Каспийского (О.К.Леонтьев, Г.И.Рычагов, Е.Г.Маев, А.И.Халилов), Берингова (А.С.Ионин), дальневосточных морей (А.С.Ионин, П.А.Каплин, В.С.Медведев и др.), Аральского моря (В.И.Лымарев), Балтийского моря (В.Л.Болдырев, Р.Я.Кнапс, К.К.Орвику и др.).

Важнейшие вопросы осадкообразования в береговой зоне морей рассмотрены в монографии Е.Н.Невесского (1967), а вполедствии обширный коллектив исследователей под его руководством выполнил ценные работы того же направления по Белому морю. Достигнуты существенные успехи в исследовании закономерностей размещения россыпных полезных ископаемых в береговой зоне моря (А.А.Аксенов, Е.Н.Невесский, Ю.А.Павлидис, Ф.А.Щербаков).

Ценные сводки составлены П.А.Каплиным по фиордовым побережьям СССР, а также по новейшей истории побережий Мирового океана, а специфические вопросы геоморфологии приливных берегов рассмотрены во многих работах В.С.Медведева. В области изучения морского волнения статистическими и специальными методами фундаментальные результаты получены Ю.М.Крыловым,

С.С.Стрекаловым , Л.А.Ещенко , В.Ф.Цыплухиным , Г.В.Ржеплинским, Г.В.Матушевским, которые обогатили наши знания о трансформации волн в береговой зоне, и их воздействии на берега и сооружения.

С конца 50-х гг. отечественные исследователи ведут значительные работы и за рубежом, в том числе на берегах и мелководьях тропических морей, что обеспечило приток новых данных по явлениям и процессам, не представленным на морских берегах СССР. Широкое плодотворное сотрудничество осуществлялось ранее в рамках научных программ СЭВ, - итогом такой работы служат весьма содержательные экспериментальные исследования процессов береговой зоны по международным экспериментам "Любятово - 1974", "Любятово - 1976", "Камчия - 77". Позднее по материалам этих исключительно ценных наблюдений издан ряд сборников, в том числе на английском языке была издана монография "Динамические процессы в береговой зоне моря" (С.М.Анцыферов, И.О.Леонтьев, Н.В.Пыхов, Н.С.Сперанский и др., 1990).

Конкретные достижения имеются в области исследования взаимодействия береговой зоны и подводных каньонов (Л.Г.Галанов, В.П.Зенкович, В.Л.Меншиков, В.М.Пешков, Г.А.Сафьянов), исследования абразии (Ф.Э.Аре, Н.В.Есин), структурно-геоморфологического анализа побережий (Л.Г.Никифоров), литодинамических процессов на берегах и моделирования береговых процессов (С.М.Анцыферов, А.С.Девдариани, Н.В.Есин, Р.Д.Косьян, И.О.Леонтьев, Н.В.Пыхов, Н.С.Сперанский, Б.А.Шуляк), обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления (Ю.С.Долотов, Е.Н.Невесский, Ю.А.Павлидис, Ф.А.Щербаков), оценке роли колебаний уровня в развитии берегов (П.А.Каплин, Г.И.Рычагов), геоморфологии и динамики прибрежных лагун (П.Ф.Бровко), эстуариев (Г.А.Сафьянов), экологии береговой зоны (В.И.Лымарев, Н.А.Айбулатов, Ю.В.Артюхин, Г.А.Сафьянов). Заметные успехи достигнуты в области подводного морского ландшафтоведения и научных основ марикультуры (К.М.Петров, В.И.Лымарев, В.М.Литвин, К.М.Хайлов, В.В.Федоров). При этом выявлена фундаментальная роль рельефа в формировании ландшафтов.

До распада СССР наиболее интересные результаты в области берегоукрепления и инженерной морфодинамики были получены на берегах Грузии (В.П.Зенкович, А.Г.Кикнадзе, Ф.Г.Меладзе, В.Л.Меншиков, В.М.Пешков, В.Г.Сакварелидзе и др.), однако в последние годы эти работы практически прекращены. В настоящее время впечатляющие успехи в этой области за короткое время достигнуты на российских берегах Черного моря (В.М.Пешков, С.А.Катков), а также на российских берегах Балтики (В.Л.Болдырев).

В самые последние годы, несмотря на большие трудности в организации экспедиции, одна за другой выходят монографии по геоморфологии и осадкам шельфа различных районов Мирового океана, представляющие собой итоги десятилетней работы выдающихся отечественных исследователей - сотрудников Института океанологии РАН (Ионин, Медведев, Павлидис, 1987; Аксенов, Дунаев, Ионин и др., 1987; Павлидис, 1992; Ионин, 1992). В значительной мере эти работы посвящены современной береговой зоне и анализу палеогеографических событий недавнего прошлого, в них сосредоточен огромный фактический материал, дается критический анализ предшествующих исследований. В США издан большой сборник статей отечественных исследователей, посвященный берегам Черного моря (*Coastlines of the Black Sea*, 1993). Эта серия публикаций продолжает и традиции кадастровых описаний. Наиболее полное отражение попытка кадастрового описания берегов Мирового океана получила в изданной большим тиражом книге "Берега" (Каплин, Леонтьев, Лукьянова, Никифоров, 1991).

Большое внимание уделено исследованиям дельтовых берегов (В.Н.Коротаев, В.Н.Михайлов, Р.С.Чалов). Геоморфологами Московского университета проведен содержательный анализ цунамиопасных районов (Диденко, Игнатов, Фроль, 1995), а также выполнена работа огромной социальной значимости - составлен технико-экономический доклад по защите берегов Каспийского моря в пределах России (ТЭД "Каспий", 1992, - Е.И.Игнатов, П.А.Каплин, Г.И.Рычагов, Г.А.Сафьянов и др.).

Таким образом, благодаря правильно выбранным направлениям, разнообразию методических подходов, сложившейся мощной школе исследователей берегов, научные и прикладные исследования морских берегов в России продолжают вполне успешно.

Ведущее место занимает наша страна и в области подготовки специалистов по изучению морских берегов. Морфология и динамика морских берегов изучаются на географическом и геологическом факультетах Московского, Ростовского, Дальневосточного, Калининградского университетов, а также в ряде других вузов. Осуществляется также широкая подготовка аспирантов как в названных вузах, так и в академических институтах. Важное место в системе подготовки кадров занимает выпуск учебников и учебных пособий. Автор надеется, что издание этой книги будет содействовать улучшению подготовки специалистов в области геоморфологии и динамики морских берегов - актуальной и перспективной отрасли естествознания.

2. ПРЕДМЕТ, СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДЫ ГЕОМОРФОЛОГИИ МОРСКИХ БЕРЕГОВ

Геоморфология морских берегов - раздел общей геоморфологии. Предмет ее изучения - рельеф, его динамика, происхождение и история формирования береговой зоны морей и океанов.

Береговая зона является зоной взаимодействия гидросферы, литосферы, атмосферы и биосферы. Береговая зона представляет собой арену интенсивной хозяйственной деятельности человечества, таким образом это взаимодействие усложняется участием ноосферы, или техносферы. Только в береговой зоне - и нигде более - имеет место взаимодействие и взаимопроникновение гидросферы, литосферы, атмосферы, биосферы и техносферы.

Береговая зона морей и океанов принадлежит к числу важнейших геофизических границ Земли. С одной стороны, она довольно четко определена приуроченностью к границе раздела сред с различной плотностью - воздушной и водной, спроектированной на поверхность третьей среды - твердой, в пределах которой и возникают при действии прибрежно-морских процессов разнообразные формы рельефа. С другой стороны, даже линия уреза воды характеризуется непостоянством и меняет свое положение в зависимости от штормовых условий, фазы прилива, давления атмосферы и многих других переменных. В частности, на протяжении плейстоцена граница суши и океана неоднократно смещалась в пределах от +5 м до -110 м по отношению к нулю современного уреза. Подъем уровня океана в ходе последней послеледниковой трансгрессии сопровождался замедляющимся во времени перемещением береговой линии в сторону континентов, пока около 6 тысяч лет тому назад не установился относительно постоянный (в пределах +2 м) уровень океана. Таким образом, возраст современной береговой зоны океана равен 6 тысячам лет в предположении относительного постоянства ее пространственных границ.

Границы береговой зоны океана или моря определяются действием специфических для нее процессов. Таким специфическим для береговой зоны процессом считается волнение (Зенкович, 1946, 1962; Лонгинов, 1963). Верхнюю границу береговой зоны обычно проводят по верхней границе ежегодно повторяющихся максимальных заплесков прибойного потока. С определением нижней границы дело обстоит не столь ясно.

Ряд исследователей указывает на существенное действие волн до глубин около 20-30 м. На больших глубинах основная роль в перемещении наносов придается действию приливных течений (в том числе, при совместном действии их с волнением), тогда как, с другой стороны, специальное исследование о движении наносов мористее зоны разрушения волн (Silvester, 1970) заключается замечанием, что “весь континентальный шельф - арена воздействия океанической зыби на осадки”. Таким образом, конкретные оценки границ береговой зоны нельзя считать общепринятыми и имеющими четкие критерии. Они могут быть однако выработаны на основе учета закономерностей распределения волнения в Мировом океане.

Учитывая различие предельных глубин воздействия волн на дно, можно считать, что каждым волнением определяются индивидуальные границы “собственной” береговой зоны. Объективным методом определения нижней границы береговой зоны должно стать применение статистики волн - режимных функций распределения параметров волн - к анализу глубин воздействия волнения на дно.

Наиболее перспективным подходом к определению границ береговой зоны является подход, основанный на анализе режимных функций распределения параметров волн. С этих позиций можно говорить о границах береговой зоны 50% или 20% обеспеченности, подразумевая, что соответствующие оценки основаны на параметрах фолн фиксированной обеспеченности.

Вместе с тем, любой реально существующий участок береговой зоны является результатом воздействия параметров волн различной обеспеченности, и неизвестно, определяется ли его геоморфологический облик длительным действием волн 50% -ной обеспеченности или кратковременным воздействием жестоких штормов, например, 0,1 %- ной обеспеченности. Исходя из этого ясно, что верхняя часть береговой зоны отражает преимущественно воздействие средних волновых условий, тогда как нижняя часть формируется преимущественно крупными волнами малой обеспеченности.

В связи с определением степени интенсивности воздействия волнения на дно, была сделана попытка ввести понятие динамического возраста береговой зоны (Сафьянов, 1978). Целесообразность введения такого понятия следует в частности из зонального распределения ледового покрова на морях высоких широт. При наличии ледового покрова на арктических морях и в морях умеренных широт воздействие волнения на их берега относительно ослаблено. Так например, динамический фозраст береговой зоны восточной части моря Лаптевых (80% года море покрыто льдом) составит лишь $6000 \text{ лет} \times 0,2 = 1200$ лет, а для восточной части Восточно-Сибирского и западной части Чукотского морей - всего лишь 600 лет.

Другой физический параметр, относящийся к границам береговой зоны - ее протяженность. Длина берегов может быть дана лишь приблизительно, поскольку неизбежно возникают проблемы, связанные с генерализацией контуров береговых линий на картах различных масштабов.

Граница континентов и Мирового океана протянулась на 473 тысячи километров (Саго, 1956). Распределение длин берегов по отдельным континентам представлено в табл.1.

Если полагать, на основе изучения гранулометрии донных осадков шельфа, что глубина внешней границы береговой зоны океана в целом около 60 м (Сафьянов, 1978), то площадь береговой зоны океана составляет не менее 15 млн. км², то есть не менее 10%

Таблица 1

Длина береговых линий континентов (тыс. км)

Евразия	190,8
Северная Америка (с островами Центральной Америки)	134,7
Южная Америка	39,9
Африка	36,2
Австралия (с Океанией)	49,7
Антарктида	22,2
Всего:	473,3

поверхности земной суши. Из самой величины поверхности береговой зоны океана следует ее важнейшая геофизическая роль.

Береговая зона по характеру движений воды разделяется на область колебательных волновых движений воды, область разрушения волн и область действия прибойного потока.

Полоса дна между нижней границей береговой зоны и линией разрушения волн представляет собой подводный береговой склон. Возвратно-поступательное движение воды, возникающее между областью последнего разрушения волны и вершиной заплеска, формирует прибойный поток. Морфологическая и литологическая

область, формируемая прибойным потоком при наличии обломочного материала, называется пляжем.

Процесс разрушения берегов или подводного склона волнами и прибоем называется абразией. Созидательная работа волн, прибоя и течений сопровождается формированием донных и береговых аккумулятивных форм рельефа.

Береговой уступ, формирующийся в результате подрезания абразией морского края суши, получил название клифа, а прилегающая к нему субгоризонтальная поверхность, выработанная волнами и прибоем, образует бенч. Если бенч распространяется на значительную часть подводного берегового склона, то его именуют абразионной платформой.

Линия пересечения современной поверхности моря с поверхностью суши образует береговую линию. Вследствие относительных или абсолютных колебаний уровня океана или моря, береговые формы рельефа могут оказаться выше или ниже того уровня, на котором они формировались. Комплексы таких реликтовых форм получили наименование древних береговых линий. Полоса поверхности литосферы, в пределах которой сохранились древние береговые линии вместе с современными формами рельефа, называются побережьем. Чаще всего в понятие побережья принято наряду с современным рельефом включать надводную часть берега, на которой сохранились следы воздействия прибрежно-морских процессов. Пространственные ограничения понятий, относящихся к различным геоморфологическим элементам побережья представлены на рис. 1.

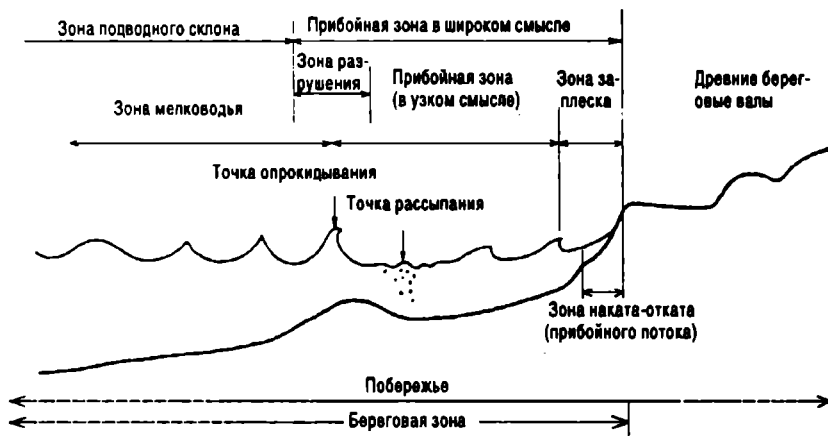


Рис. 1. Схема строения побережья

Большинством исследователей береговая зона понимается как поверхность, рельеф которой создан волнами при данном уровне моря (Зенкович, 1946, 1962). На самом деле береговая зона имеет определенную, в общем случае переменную по профилю толщину и занимает некоторое трехмерное пространство. Несомненно, что она - часть контактной зоны океана. Донную контактную зону В.В.Лонгинов (1977, с.100) определяет как "зону механического взаимодействия движущихся масс воды и донного материала между собой и с неподвижным дном". Можно, по-видимому, считать, что береговая зона представляет собой часть донной контактной зоны океана, в которой градиенты взаимодействия вдоль поверхности дна имеют максимальные величины.

Следует иметь в виду, что современная береговая зона океана, как и побережья, окаймляющие континенты, представляют собой часть ландшафтной оболочки Земли, подвергающуюся воздействию множества факторов и процессов с различным характерным временем воздействия. Так например, при оценке эффективности воздействия волн на берега для интервалов времени до нескольких лет можно пренебречь изменениями уровня, составляющими первые миллиметры или доли миллиметров в год. Однако такие изменения уровня, действуя в течение тысячелетий, охватывают периметр всех берегов Мирового океана и определяют генеральный фон для действия процессов с меньшим периодом. Поэтому при оценке роли того или иного процесса нужно ясно представить себе пространственные и временные рамки его воздействия на берега (рис.2).

Все процессы, имеющие периоды действия до 0,1 года, такие как волны разнообразной природы, приливы или золовый перенос воздействуют главным образом на верхнюю часть береговой зоны (пляж) и имеют протяженность вдоль берегов порядка длин береговых аккумулятивных форм (обычно до 300 км).

Процессы и факторы с периодом действия от долей года до сотен лет такие, как сезонная изменчивость штормов, приток наносов, антропогенное воздействие, деформации подводного берегового склона, геоморфологические изменения проливов и мысов охватывают пространства от первых километров до 10 тысяч километров.

Такие глобальные процессы, как изменения уровня океана, обусловленные оледенениями, охватывают интервалы времени в десятки и сотни тысячелетий и проявляются на огромных пространствах, охватывающих тысячи и десятки тысяч километров.

Основным методом геоморфологии морских берегов является изучение рельефа с помощью разнообразных съемок. Учитывая, что наибольшая часть береговой зоны расположена под водой, решающую роль в геоморфологии играют съемки подводного берегового склона с

помощью косвенных методов, прежде всего эхолотирования. Часто эхолотирование применяется в комплексе с сейсмоакустическими методами, позволяющими получить представление о распространении и свойствах чехла рыхлых отложений. Однако во многих случаях косвенных методов изучения рельефа недостаточно, и важное место занимают подводные наблюдения с помощью легководолазной техники, а также с применением погружаемых аппаратов. При этом широко используется фотографирование дна.



Рис.2. Временные и пространственные масштабы береговых изменений (Fenster, Dolan, 1993). Каждый прямоугольник отражает пространственное (вдольбереговое) воздействие различных процессов или антропогенных факторов, ответственных за перемещение береговой линии, и длительность этих процессов.

Основные черты рельефа берегов и прибрежных мелководий, а также некоторые вопросы литодинамики десятилетиями изучаются с

помощью аэрофотосъемок, а в последние годы широкое распространение получило и исследование рельефа и процессов береговой зоны океана с помощью дистанционной космической съемки. Применение специализированных съемок в различных зонах спектра позволяет резко увеличить объем получаемой из космоса информации. Космические съемки обладают колоссальными возможностями в отношении объемов получаемой информации и повторении съемок через необходимые интервалы времени для получения динамических характеристик явлений.

В большинстве случаев массовые перемещения наносов проявляются в изменениях рельефа береговой зоны. Именно поэтому изучение массовых перемещений наносов представляет собой основное средство исследования динамики рельефа. И наоборот, динамика рельефа (морфодинамика) - одно из самых надежных средств исследования массовых перемещений наносов.

Для изучения динамики наносов (литодинамики) применяется широкий набор методов, частично заимствованных из смежных наук, а частично, созданный применительно к геоморфологическим задачам. Успешно применяются методы индикации движения наносов мечеными частицами, широкое распространение получили методы естественной индикации, когда в качестве трассеров используется минералогический или петрографический состав естественных наносов, а также изменения гранулометрического состава.

Вообще методы постановки экспериментов в природных условиях получили приоритетное место в работах геоморфологов-береговиков.

Движение наносов изучается в морфодинамике и с энергетических позиций, поскольку литодинамика береговой зоны неразрывно связана с движением и трансформацией волн и возникновением производных течений. Исследование трансформации волн в береговой зоне невозможно без учета рельефа подводного берегового склона.

Многие вопросы динамики прежде всего подводного рельефа трудно изучить в условиях штормового моря, и поэтому для выявления деталей природных процессов уже со времен Леонардо да Винчи широко применяется лабораторное моделирование.

В последние годы, в связи с возросшими техническими возможностями, большое распространение получили и методы математического моделирования динамики рельефа.

Как и в других науках географического цикла, важнейшее место в геоморфологии морских берегов занимает картографирование. Анализ пространственного положения объектов геоморфологического

картографирования морских берегов и побережий дает возможность не только восстановить историю возникновения рельефа, но и представляет средство прогноза динамики и эволюции рельефа. Даже если исходить из необходимости раскрытия основных закономерностей массовых перемещений наносов, то и тогда следовало бы начать с изучения волнения, течений и других движений воды - гидродинамики береговой зоны моря. Следует заметить, что рельеф мелководий - ведущий фактор трансформации волнения, приливов и течений. Вместе с тем многие геоморфологические особенности берегов в значительной мере - результат воздействия гидрогенных процессов.

Поэтому в первой части учебного пособия рассматриваются вопросы гидродинамики береговой зоны. Движения воды сопровождаются массовыми перемещениями наносов, разрушением коренных пород, измелчением наносов. Общие закономерности движения наносов при действии экзогенных агентов и силы тяжести составляют предмет литодинамики береговой зоны. Практически наиболее важной частью литодинамических исследований является установление закономерностей изменения рельефа береговой зоны. Во второй части книги предпринимается попытка рассмотрения литодинамики береговой зоны. Под морфодинамикой береговой зоны моря понимаются обычно кратковременные изменения рельефа, происходящие на протяжении интервалов времени порядка длительности шторма или сезонных штормовых циклов. Несомненно, что это наиболее интересная часть геоморфологии морских берегов и весьма ценная - в практическом отношении. Вместе с тем геоморфология морских берегов гораздо шире по содержанию, - она включает также и ту эволюцию рельефа, которая является продуктом длительного развития берега в сложной геолого-географической обстановке. Для формирования облика побережья, наряду с действием современных процессов, могут иметь важнейшее значение предшествующая история развития региона, длительные колебания уровня океана, тектонические движения, изменения поступления наносов, изменения климата. Все эти и многие другие условия получают интегральное воплощение в особенностях геоморфологии побережья.

Третья часть книги посвящена морфодинамике и геоморфологии морских берегов.

ЧАСТЬ I

ГИДРОДИНАМИКА БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ

*Изучая движение воды, не забудь из
каждого обнаруженного явления
сделать вывод для практики, чтобы
твоя наука не осталась бесполезной.*
Леонардо да Винчи

3. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Единым процессом, объединяющим все виды движения вещества в береговой зоне, можно считать процесс трансформации и рассеивания механической, химической и тепловой энергии прибрежных вод, поступающей в береговую зону. Сама береговая зона является областью трансформации и рассеивания энергии прибрежных вод в процессе их взаимодействия с твердым веществом литосферы.

Основным источником энергии для процессов перемещения вод и наносов береговой зоны, для разрушения коренных пород служит энергия ветровых волн и возбуждаемых им течений. С ростом глубины происходит быстрое затухание волновых скоростей, поэтому воздействие волн на дно ограничивается обычно глубинами в первые десятки метров и лишь при наиболее сильных штормах распространяется до глубины около 100 м. Ветер не только приводит к появлению волн, но и способен вызвать ветровые (дрейфовые) течения, перемещать пляжевые пески, что ведет к возникновению дюн и других эоловых форм рельефа морских побережий. Системами ветров на поверхность океана передается кинетическая энергия порядка 10^{11} кВт ($1 \text{ кВт} = 10^{10} \text{ эрг с}^{-1}$). Основная часть энергии, поступающей в океан из атмосферы, а также за счет приливных колебаний уровня, рассеивается в береговой зоне океана.

Наибольшая доля общей энергии, приходящей в береговую зону, связана с ветровыми поверхностными волнами. Волна высотой 3 м переносит около 100 кВт энергии на 1 м линии гребня. В среднем ветровые волны в океане имеют высоту около 1 м, и переносимая ими мощность составляет около 10 кВт на 1 м фронта волны. При длине береговой линии Мирового океана 468 тыс. км общая диссипируемая энергия составляет величину порядка $4,7 \cdot 10^9$ кВт. Однако это значение, по-видимому, слишком велико для осредненной диссипации энергии на берегах Мирового океана, поскольку не все береговые линии экспонированы к открытому океану. Более приемлемая оценка средней скорости диссипации энергии поверхностными волнами в прибрежных водах составляет от 1/2 до 2/3 этой величины, а именно $3,1 \cdot 10^9$ кВт.

Вторым по значимости источником энергии для гидродинамических процессов, а также для перемещения осадков

служат приливные волны. Рассеивание их энергии происходит главным образом в пределах мелководий океана. Главная часть приливной энергии расходуется в виде сильных течений в мелководных районах, подобных шельфам Берингова, Охотского морей и шельфу Аргентины. Общая величина расхода энергии лунных и солнечных приливов на мелководье Мирового океана – около $2,7 \cdot 10^9$ кВт, т.е. несколько меньше величины энергии, определяемой действием волн.

Другие источники энергии играют сравнительно небольшую роль в прибрежных водах. Даже наиболее эффективные волны цунами, являющиеся причиной гибели многих людей и разрушения береговых сооружений малозначимы, поскольку мощные цунами с энергией в $5 \cdot 10^{15}$ Дж случаются примерно 5 раз в столетие, а осредненная величина диссипации энергии цунами около 10^5 кВт. Гораздо более очевидной в последние годы стала роль краевых и инфраграгравитационных волн. Однако отсутствует возможность оценки относительного вклада их в общую энергию гидрогенных процессов береговой зоны океана. По-видимому, отчасти или в значительной мере, источником их энергии становится перераспределение энергии ветровых волн в сравнительно низкочастотную область. Можно считать, что общая оценка диссипации механической энергии на мелководьях океана составляет около $6 \cdot 10^9$ кВт.

Очевидно, что исследование процессов в береговой зоне должно быть основано как на тщательной оценке количеств энергии, поступающих из различных источников, параметров волн и действия течений, так и на определении механизмов взаимодействия волн, течений и осадков.

Возникает необходимость в уточнении некоторых общих понятий и терминов, используемых при описании явлений в береговой зоне. Границы береговой зоны проводятся там, где заканчивается действие типичных для нее процессов. За нижнюю границу ее обычно принимают глубину, на которой начинается перемещение песчаных частиц волнением. Верхняя граница проводится по верхней границе наиболее мощных ежегодно повторяющихся заплесков, хотя нередко она маскируется действием субазральных процессов.

Береговая зона по характеру движений воды и вызываемых ими перемещений наносов может быть разделена на подзоны: 1) колебательных волновых движений воды, 2) разрушения волн (прибойную) и 3) действия прибойного потока (заплеска).

Первая область охватывает подводную часть береговой зоны от начала движения наносов и до области разрушения волн. Вторая – может быть исключительно разнообразной как по характеру движения воды, так и по своему протяжению, в зависимости от рельефа и параметров волны. Третья – располагается от места последнего разрушения волны до вершины заплеска.

Даже изучая только лишь литодинамику береговой зоны следует раньше исследовать закономерности движения воды, вызываемые волнением, а также некоторые способы их описания.

4. ВОЛНЫ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ

Общие сведения о волнении

Волна представляет собой такую форму периодического движения, при которой частицы среды совершают колебания вокруг некоторого центра.

В дальнейшем будут использованы следующие понятия, определяющие элементы волн (рис. 3).

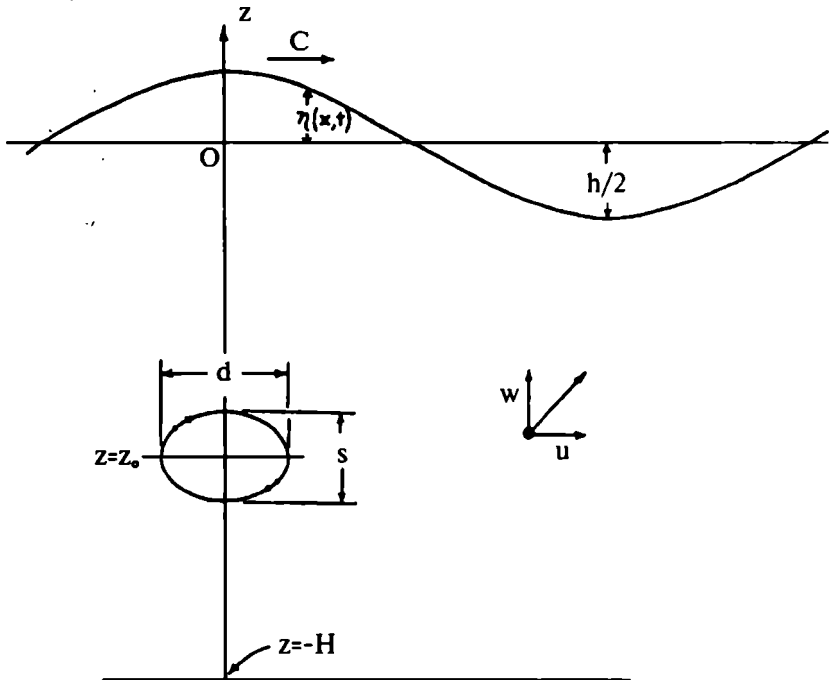


Рис. 3. Система координат и профиль волны.

Длина волны (λ) - расстояние по горизонтали между ближайшими точками поверхности волны, находящимися в одинаковой фазе движения.

Высота волны (h) или двойная амплитуда колебания ($2a$) - расстояние по вертикали от вершины волны до нижней точки ложбины.

Период волны (τ) - время, необходимое для повторения одинаковых фаз движения.

Частота ($\mu = 2\pi/\tau$ или $1/\tau$) - величина, обратная периоду волны.

Скорость распространения волны (фазовая скорость) (С) - отношение длины волны к ее периоду. Второе ее определение связано с перемещением в виде волн не материальных частиц, а формы волны, зависящей от фазы волнового движения.

Гребень волны - верхняя часть волны, выступающая над спокойным уровнем. Наивысшая точка волны - ее вершина.

Фронт волны - линия, проходящая вдоль гребня волны.

Луч (ортогональ) волны - линия, перпендикулярная фронту волны и направленная в сторону ее распространения.

Угол подхода волн - угол между фронтом волны и линией берега (или изобатой), или угол между лучом волны и перпендикуляром к изобате (линии берега).

Ложбина волны - часть волны, расположенная ниже спокойного уровня.

Склон волны - часть волны от вершины до нижней точки ложбины.

Кинематика волны

Самым характерным свойством волнения является орбитальное движение частиц жидкости в толще воды. В волне на глубокой воде они совершают круговые колебания. Частицы на одной вертикали всегда движутся синхронно, без запаздывания по фазе. При прохождении гребня частицы в створе гребня перемещаются в направлении распространения волны, при прохождении ложбины - движутся в противоположном направлении. Таким образом, за период волны происходит непрерывная смена направления движения. В смене знака движения состоит коренное отличие волнового потока от поступательного (рис.4) иллюстрирует волновое движение в толще жидкости.

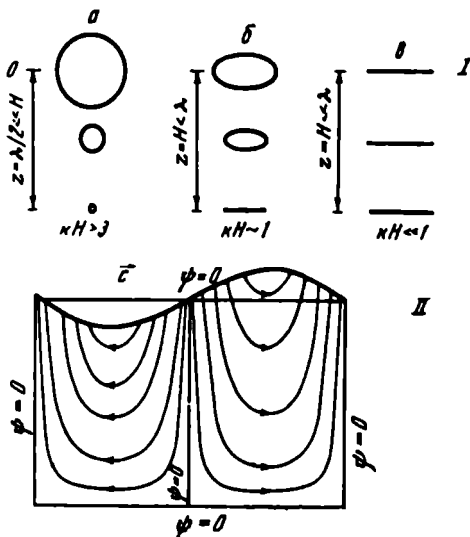


Рис. 4. Схема кинематики прогрессивной (бегающей) волны.

1 - траектории частиц жидкости: а - глубокая вода, б - не очень глубокая вода, в - мелкая вода; 2 - линии токов

коренное отличие волнового потока от поступательного (рис.4) иллюстрирует волновое движение в толще жидкости.

По мере увеличения глубины орбиты движения частиц жидкости быстро уменьшаются, в соответствии с этим происходит затухание орбитальных скоростей.

По характеру перемещения частиц жидкости во взволнованной толще можно выделить типы волн:

1. Прогрессивные волны, имеющие видимое поступательное движение формы волны, тогда как сами, частицы колеблются вокруг некоторых центров.

2. Волны перемещения или поступательные — частицы жидкости помимо колебательных движений имеют еще и поступательное перемещение в направлении распространения волн. Орбиты колебаний таких волн оказываются разомкнутыми.

3. Стоячие волны — частицы жидкости совершают колебательные движения по разомкнутым орбитам параболического вида без горизонтального перемещения формы волны.

В прогрессивных волнах на глубокой воде орбиты частиц замкнуты, однако по мере уменьшения глубин правильность орбит нарушается, ближе ко дну эллипсы превращаются в "караваи", размыкание орбит усиливается — растет перенос жидкости в сторону движения волн.

Направления исследования волнения

Для ветровых волн характерны три основных свойства:

- 1) квазипериодичность и взаимозависимость элементов движения;
- 2) тесная связь размеров волн с ветровыми условиями — скоростью и продолжительностью ветра, протяженностью водоема и его глубинами;
- 3) сложность и хаотичность движений поверхностного слоя воды.

В соответствии с перечисленными свойствами волн сложились следующие направления исследований волнения (Крылов, 1966): гидродинамическое, энергетическое, статистическое и спектральное.

Гидродинамическое направление изучает простые периодические волны в разнообразных условиях их распространения. Энергетическое направление исследует зависимость элементов волн от волнообразующих факторов — скорости ветра, его продолжительности, разгона и глубин. Статистическое направление имеет целью исследование разнообразия элементов волн. В последние годы бурно развиваются спектральные исследования, ставящие целью объединение указанных трех направлений и создание на этой основе стройной физической теории явления.

Основной метод гидродинамических исследований волн состоит в математическом изучении периодических движений идеальной (невязкой) жидкости со свободной поверхностью.

Энергетическое направление изучения волн имеет ряд недостатков. Сложное волновое движение заменяется системой правильных двумерных волн. Такая схематизация приводит к выводу о том, что размеры волн зависят только от величины скорости ветра, продолжительности ветра и расстояния от подветренного берега. В

действительности же волновое поле является сложной функцией синоптических и морфометрических условий водоема.

Важнейшим свойством волн является сложность и хаотичность структуры взволнованной поверхности. Изучение этого свойства велось двумя путями: 1) исследовались законы распределения наблюдаемых элементов волн – высоты, периода, длины; 2) изучалась внутренняя спектральная структура взволнованной поверхности.

Главная задача статистики волн состоит в изучении функций распределения элементов волн, характеризующих разнообразие их числовых значений. Различают два рода функций распределения. Одни описывают разнообразие элементов волн за малый промежуток времени, в течение которого средние элементы волн можно приближенно считать постоянными; их называют квазистационарными функциями, или функциями распределения (рис 5). Другие характеризуют разнообразие элементов волн в многолетнем разрезе, их называют режимными.

Спектральное направление позволяет преодолеть формалистичность статистики волн и ее оторванность от физики процесса, и успехи спектрального направления уже наметили слияние физики и статистики волн.

Известно, что любое сложное волновое движение может быть описано совокупностью простых волн. Распределение энергии между этими простыми волнами характеризуется энергетическим спектром. Изучение энергетического спектра морских волн позволяет подойти к анализу физической сущности волнового процесса.

Рис. 5. Интегральные функции распределения высоты волновых колебаний для двух записей волнографа

Теории волнового движения

В настоящее время в практике исследования морских берегов используется пять теорий волн. Общая характеристика формы волны и сферы применения этих теорий обозначены на рис. 6.

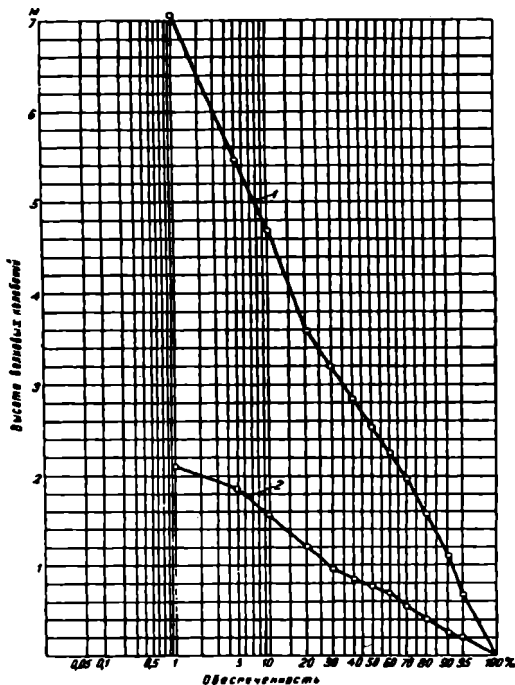


Рис. 6. Основные черты теорий волн



Волны Эри (синусоидальные)

Применение: волны малой амплитуды на глубокой воде



Волны Стокса и Герстнера (трохоидальные)

Применение: волны конечной амплитуды на глубокой, промежуточной и мелкой воде



Кноидальные волны

Применение: волны конечной амплитуды на промежуточной и мелкой воде



Одиночные волны

Применение: одиночные или изолированные гребни ограниченной амплитуды, движущиеся на мелкой воде

Наибольшей популярностью среди них пользуется теория волн Эри, теория Стокса и теория одиночных волн. Другие теории из-за относительно узкой области применения или других особенностей характеризуются здесь в самом общем виде.

Теория волн Эри (линейная теория волн малой амплитуды)

При выводе уравнений линейной теории гравитационных волн малой амплитуды на поверхности идеальной жидкости исходят из следующих предпосылок (Кочин, Кибель, Розе, 1963):

1. Жидкость идеальна, т.е. влияние сил вязкости на волнение несущественно.
2. Жидкость несжимаема и однородна.
3. Жидкость находится в поле силы тяжести, и волновое движение, возникающее при действии возмущений (например, импульсов давления), приложенных в начальный момент времени, является потенциальным, т.е. невихревым.

Насколько реальны предпосылки теории?

