

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИН ПОДВОДНОГО БЕРЕГОВОГО СКЛОНА, СЛОЖЕННОГО ПОДВИЖНЫМИ НАНОСАМИ<sup>1</sup>**

При практическом анализе рельефа подводного берегового склона чаще всего пользуются промерным материалом единичных поперечных профилей, направленных приблизительно под прямым углом к контуру береговой линии. Из такого фактического материала, главным образом, и получены основные представления, касающиеся вида профиля и распределения глубин, вошедшие как в фундаментальные научные издания, так и в учебные пособия [1–8]. Анализ реальных единичных профилей подводного берегового склона привел к заключению о разнообразии их форм. Между тем, исследование распределения глубин на подводном береговом склоне затруднено множественностью факторов, влияющих на характер их распределения. Поступления и потери наносов, структурно-геологические и литологические условия, частота и интенсивность воздействия волнения, колебания уровня – далеко не полный перечень воздействующих факторов.

Для познания основных закономерностей формирования профиля подводного берегового склона широко применялись экспериментальные исследования, в ходе которых на склон, сложенный подвижными наносами, воздействовали волны постоянных параметров. Опыты, проведенные в экспериментальных бассейнах и лотках, привели к заключению, что при достаточно длительном воздействии волн на склон, сложенный подвижными наносами, формируется его устойчивый профиль, не изменяющий своей формы при дальнейшем воздействии. Так было достигнуто экспериментальное подтверждение возможности существования профиля динамического равновесия, под которым понимается профиль, вдоль поверхности которого градиент расхода наносов равен нулю, т.е. изменения рельефа прекращаются – вырабатывается стационарная форма профиля. Для достижения состояния динамического равновесия в экспериментальных условиях оказывалось достаточном воздействием  $10^4 \dots 10^5$  волн. Для натурных условий длительность такого воздействия соответствует ориентировочно 7–9 сут, что представляется вполне реальным для многих прибрежных регионов океана. Однако и при меньшей длительности единичных штормов, следующих с разрывом во времени, можно полагать, что достигается сходство суммарного эффекта воздействия.

Хотя рядом исследователей выражались сомнения в возможности достижения в природных условиях профиля динамического равновесия, возникновение равновесных ситуаций на ограниченных пространствах береговой зоны представляется вполне реальным, а в лабораторных условиях динамическое равновесие на подводном склоне возникало как неизбежный продукт длительного взаимодействия волн и подвижных наносов.

Имеется единство мнений, что форма профиля подводного берегового склона, сложенного подвижными наносами, определяется гидравлическими характеристиками наносов и режимом волнения. При этом можно считать установленным, что гидравлически более крупным частицам соответствует большая крутизна профиля. Из-за наличия волнового переноса жидкости в направлении луча волны и существования асимметрии орбитальных скоростей более мощным штормам соответствует большая крутизна профиля подводного склона. Итогом работы волн на берегах служит формирование такого профиля подводного склона, на котором минимизируется транспорт наносов, а наиболее крутым участкам дна отвечают гидравлически наиболее крупные частицы. В связи с экспоненциальным затуханием орбитальных скоростей с глубиной, максимальные придонные скорости приурочены к верхним горизонтам водной толщи. Именно здесь, на мелководье, происходят наиболее значимые деформации рельефа, полностью соответствующие максимальному градиенту скоростей на единицу глубины потока. Определенная зависимость морфологии подводного склона от параметров волн позволяет надеяться, что при статистическом анализе свойств рельефа проявятся наиболее общие его черты. На успехи такого анализа позволительно надеяться и потому, что в области режимных функций морского волнения получен ряд фундаментальных результатов [9]. Кроме того, статистический подход к анализу распре-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08.03.08.014 Мин. науки РФ).

| № п/п | Море           | Регион                                           | Площадь от уреза до глубины 30 м (км <sup>2</sup> ) | Масштаб карты | Длина вдоль берега (км) |
|-------|----------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------|-------------------------|
| 1     | Охотское       | зал. Шелихова                                    | 485                                                 | 1 : 50000     | 19                      |
| 2     | Охотское       | Наяханская губа                                  |                                                     |               |                         |
| 3     | Охотское       | Зап. Камчатка от р. Крутогорова до р. Морошечная | 1950                                                | 1 : 250000    | 108                     |
| 4     | Охотское       | Зап. Камчатка от р. Морошечная до р. Сопочная    | 2350                                                | 1 : 250000    | 110                     |
| 5     | Охотское       | СЗ побережье от м. Низкий до г. Охотск           | 1767                                                | 1 : 250000    | 125                     |
| 6     | Южно-Китайское | побережье Вьетнама от м. Бакьен до м. Кага       | 1664                                                | 1 : 200000    | 52                      |
| 7     | Японское       | СЗ побережье м. Низменный                        | 12,4                                                | 1 : 25000     | 11,3                    |
| 8     | Берингово      | Чукотский п-ов коса Мээчкын                      | 1760                                                | 1 : 250000    | 75                      |
| 9     | Средиземное    | устьевое взморье р. Нил                          | 7497                                                | 1 : 235000    | 224                     |
| 10    | Черное         | вблизи устья р. Капарча                          | 11,9                                                | 1 : 25000     | 5                       |
| 11    | Черное         | вблизи порта Потти                               | 3,2                                                 | 1 : 10000     | 1,5                     |
| 12    | Черное         | у м. Искурия                                     | 0,23                                                | 1 : 2000      | 1                       |
| 13    | Черное         | устьевое взморье р. Кодори                       | 0,15                                                | 1 : 2000      | 0,6                     |
| 14    | Черное         | устьевое взморье р. Чорохи                       | 0,12                                                | 1 : 2000      | 0,6                     |
|       | Черное         | вблизи р. Батуми                                 | 16,4                                                | 1 : 10000     | 4,6                     |

деления глубин представляется перспективным, поскольку форма статистически определенного профиля интегрирует влияние многих факторов и способствует выявлению наиболее устойчивой формы подводного берегового склона.

Исходным фактическим материалом для исследования статистики глубин подводного берегового склона послужили батиметрические карты 15 прибрежных регионов до глубины 30 м с сечением изобат не менее 5 м. Масштаб карт изменялся от 1 : 2000 до 1 : 250000. Основные характеристики этих регионов представлены в таблице.

Суммарная площадь исследованных пространств береговой зоны океана составила 17517 км<sup>2</sup>, а суммарная длина берегов достигла 737,6 км. Как следует из данных таблицы, промерный материал характеризовал различные географические условия берегов от Арктики до тропиков. Практически все регионы береговой зоны по сведениям, полученным из публикаций и карт, имеют довольно развитый чехол рыхлых осадков на подводном склоне. Все берега подвергаются достаточно интенсивному, хотя и различающемуся по энергии, воздействию волн. Источники поступающих осадков имеют различную природу: аллювиальный приток, возможное поступление (перераспределение) отложений с подводного склона, поступление вследствие размыва, биогенная продукция наносов. В ряде случаев возможно сочетание различных источников обломочного материала.

Несомненно, что привлекаемый фактический материал представляет собой статистическую совокупность. Для 14 карт региона из 15 сечение изобат составляло 5 м и менее. Заслуживает обоснования принятое значение глубины 30 м для нижней границы береговой зоны океана. Вопрос о нижней границе береговой зоны довольно детально рассмотрен в работах автора [4–5], где приведена также библиография, характеризующая крайние точки зрения по этой проблеме. В частности, по мнению некоторых исследователей [10, с. 70], "весь континентальный шельф – арена воздействия океанической зыби на осадки". Более

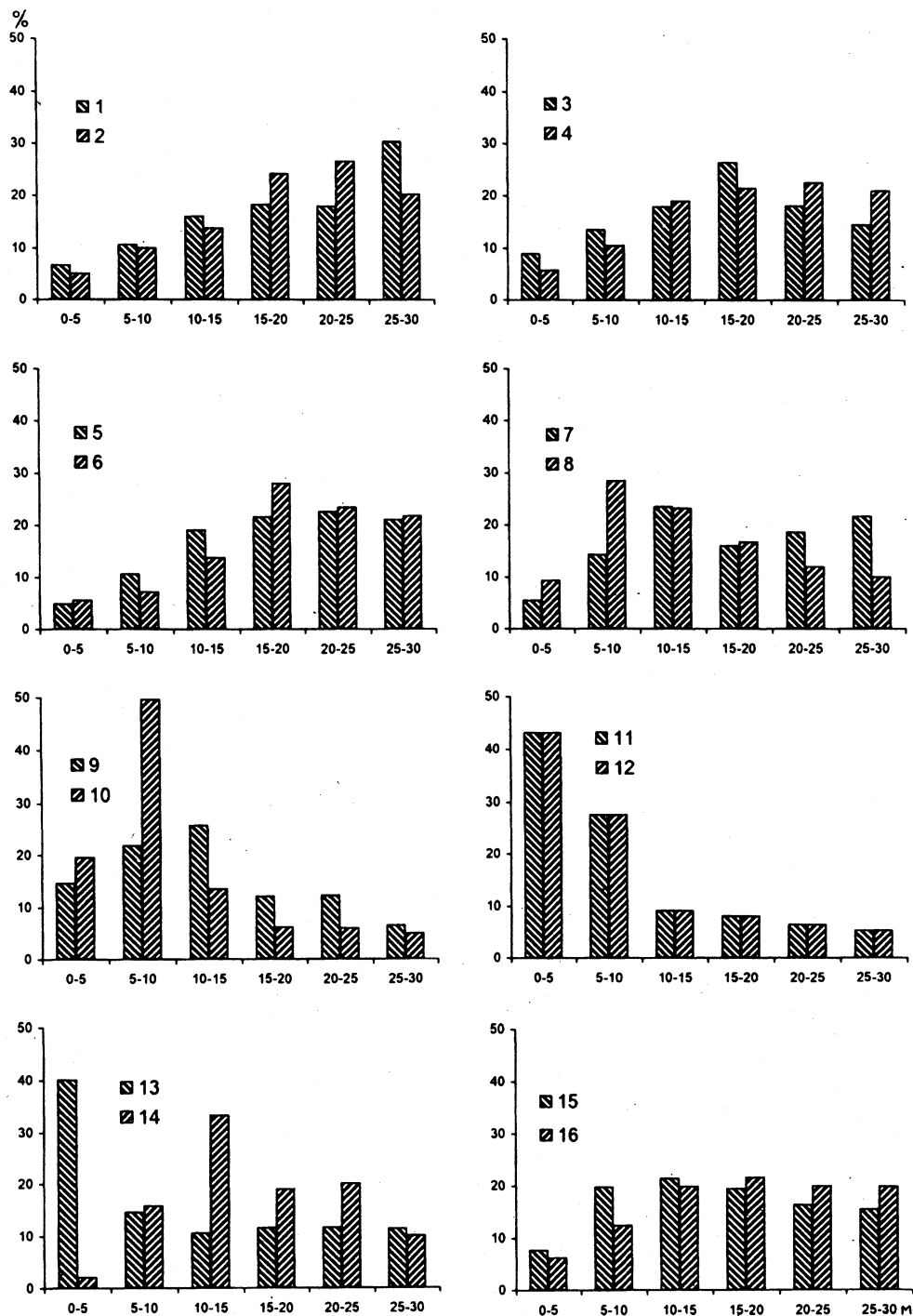


Рис. 1. Частотные диаграммы распределения глубин подводного берегового склона  
По горизонтали – интервалы глубин (м), по вертикали – процент общей площади подводного склона, занятой данным диапазоном глубин. 1–14 – номера береговых регионов (соответствуют таблице); 15–16 – суммарное распределение частот глубин: 15 – по всем регионам, 16 – то же, исключая приустьевые области

традиционно представление, что нижней границей береговой зоны может считаться глубина, соответствующая одной трети длины наиболее крупных штормовых волн. Полагая, что штормовые волны с периодом 7–8 с довольно типичны для океанических и морских берегов (включая, например, берега Черного моря), получаем для одной трети таких волн значения предельных глубин воздействия 27–34 м. Разумеется, действие более жестоких штормов меньшей обеспеченности проявляет себя и на больших глубинах. Однако значительные деформации рельефа на глубинах более 30 м практически исключены. Между тем, время воздействия штормов на протяжении последних 6000 лет относительно постоянного уровня океана вполне достаточно для формирования на подводном склоне до глубины 30 м профиля, соответствующего уровню штормового воздействия.

В ходе анализа распределения глубин на подводном склоне рассматривались частотные распределения глубин с интервалом в 5 м и интегральные (батиграфические) кривые. Частотные распределения (рис. 1) характеризуются абсолютным преобладанием унимодальных распределений (76%). Мода на малых глубинах (0–5) характерна для приустьевых взморьев с явным преобладанием питания подводного склона аллювиальным материалом. Несколько большим значением моды (5–10 м или 10–15 м) отличаются регионы бывших устьевых взморий, существенно преобразованные волнением. К ним относятся взморье Нила, м. Искурия (где еще за 5 лет до съемки впадал один из рукавов р. Кодори), район Потти (до 1939 г. находившийся под влиянием стока р. Риони), район вблизи г. Батуми (около 150 лет тому назад представлявший собой устьевой выступ р. Меджина – рукава р. Чорохи).

Регионы, подвергающиеся интенсивному воздействию волн или ограниченной роли внешнего (с суши) поступления наносов, как правило, имеют моду распределения, превышающую 15 м и тяготеющую к нижней части подводного берегового склона.

Обобщение статистики глубин для всех регионов с учетом их долевого участия (в зависимости от площади подводного берегового склона) приводит к заключению, что на глубинах 5–20 м формируется пологовершинный максимум частоты, где распределение по 5-метровым интервалам довольно равномерно со слабовыраженной модой в диапазоне 10–15 м. Гистограмма распределения глубин явно асимметрична и характеризуется резким уменьшением частот к диапазону 0–5 м и сравнительно постепенным уменьшением частот площадей с ростом глубин в нижней части подводного берегового склона.

Если анализировать распределение глубин, исключив из рассмотрения придельтовые регионы, то частотное распределение характеризуется почти равномерным распределением в области от 10 до 30 м с небольшим максимумом в диапазоне 15–20 м и резким, все возрастающим уменьшением частот с приближением к береговой линии.

Резкие изменения частот распределения глубин полностью соответствуют градиентам придонных скоростей, которые, как известно, по экспоненциальному закону затухают с ростом глубин и на малых глубинах имеют наибольшие величины.

Другой способ анализа распределения глубин – батиграфические кривые или интегральные функции превышения глубин. Ранее батиграфические кривые предлагались в качестве средства изучения динамики береговой зоны моря [11], в дальнейшем были получены положительные результаты анализа бюджета наносов с помощью батиграфических кривых за довольно длительный интервал времени [12].

Одно из достоинств метода батиграфических кривых состоит в наглядности представления формы профиля подводного берегового склона в виде обобщенной кривой, физиономически точно отражающей основные особенности его геоморфологии – соотношение площадей и уклонов на подводном склоне.

Региональный анализ рельефа методом батиграфических кривых (рис. 2, 3) позволяет выделить два преобладающих типа подводного склона – вогнутые и выпуклые. Вогнутые кверху профили характеризуют типичные регионы береговой зоны океана, не имеющие значительного поступления наносов со стороны суши. Вогнутые профили распределения глубин отличаются резким уменьшением площадей, занятых подводным склоном на малых глубинах. Это свойство связано с соответствующим нарастанием уклонов в верхней части подводного берегового склона.

Выпуклые профили отвечают современным приустьевым участкам, имеющим значительные поступления наносов со стороны суши. Резкий перегиб этих профилей происходит на глубинах 10–15 м.

Заметна реакция распределения глубин не только на поступление наносов, но и на их потери. Так, приустьевое взморье р. Чорохи характеризуется усеченностью нижней части подводного склона. Это связано с проникновением в береговую зону верховьев Чорохского подводного каньона и потерями значительных объемов обломочного материала, поступаю-

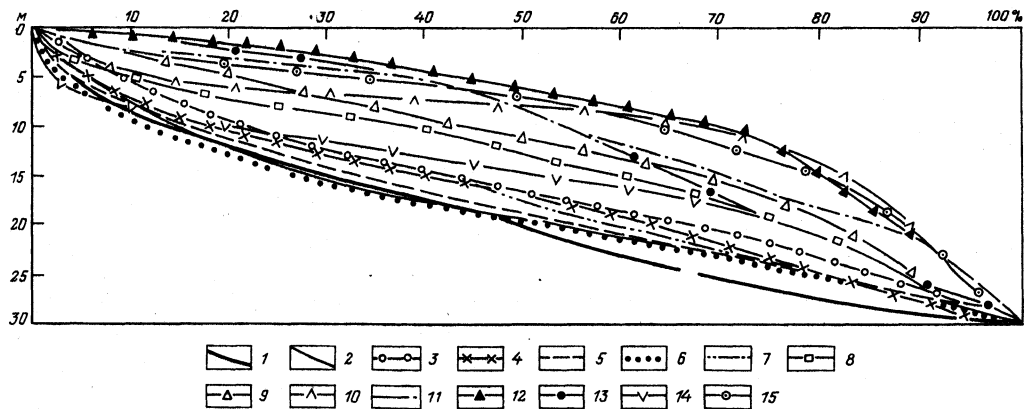


Рис. 2. Батиграфические кривые береговой зоны отдельных береговых регионов

По горизонтали – кумулятивные проценты площади подводного склона, по вертикали – глубины (м). 1–14 – номера батиграфических кривых, соответствующие номерам регионов в таблице; 15 – экспериментальная кривая профиля динамического равновесия, полученная из лабораторных опытов

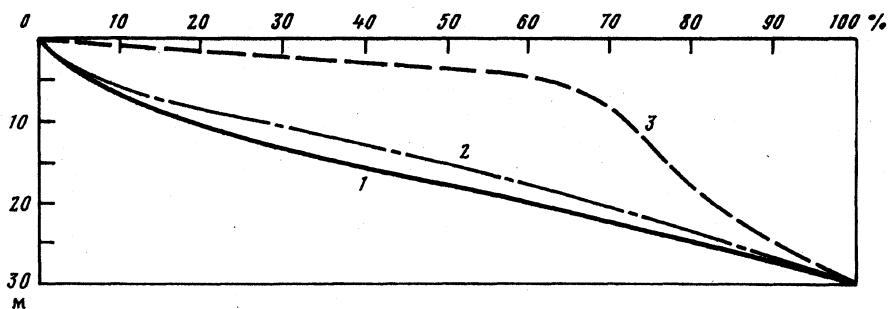


Рис. 3. Итоговые батиграфические кривые

1 – по всей площади 14 регионов (сечение изобат 5 м), 2 – по всей площади, за исключением приустьевых областей (сечение изобат 5 м), 3 – батиграфическая кривая подводного склона о. Родригес (Индийский океан, площадь 303 км<sup>2</sup>, сечение изобат 10 м)

щего из реки. Столь же усеченную форму нижней части подводного склона имеет и район Черного моря у м. Искурия. Эта особенность его морфологии связана в основном с добычей здесь на подводном склоне на глубинах от 8 до 12 метров песков в течение нескольких лет, что и вызвало изменения морфологии, подобные тем, которые являются следствием потерь наносов через подводные каньоны.

Районы бывших приустьевых участков, сравнительно недавно лишившихся обильных источников наносов (например, в районе порта Потти), резко изменили морфометрию в пределах малых глубин, но сохранили информацию о прошлом на глубинах более 10 м. Наиболее интенсивны преобразования по 240-километровому периметру дельты Нила, где в настоящее время функционирует лишь две протоки, тогда как шесть-семь веков тому назад существовала и третья протока в центральной части дельты. Всего в историческое время действовало семь протоков Нила. Ограниченный характер влияния поступления аллювиального материала и значительная роль волнения придает батиграфической кривой взморья Нила промежуточные черты – вогнутую форму в верхней части подводного склона (на глубинах до 10 м) и слабывогнутую форму на глубинах более 15 м.

Роль поступления наносов в формировании профиля подводного склона в ходе размыва волнами песчаного клифа изучалась автором в лабораторных условиях. Соответствующая батиграфическая кривая динамически устойчивого подводного профиля после длительного воздействия волн характеризуется значительным сходством с батиграфическими кривыми дельтовых участков, но отличается от них слабывогнутой формой на малых глубинах.

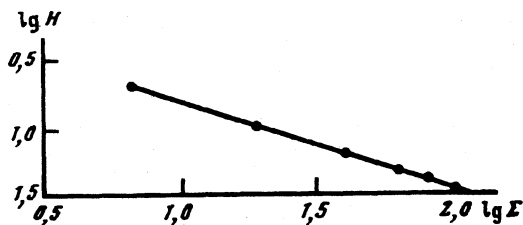


Рис. 4. Зависимость глубин от кумулятивной площади в логарифмическом масштабе для всей площади, исключая приустьевые области

Поразительное сходство с приустьевыми областями по форме батиграфической кривой обнаружилось и для кораллового берега о. Родригес (Маскаренские о-ва, Индийский океан). Особенностью коралловых архипелагов является продукция биогенного рифового материала в области малых глубин, который и представляет собой основной источник наносов. Хотя сечение изобат на карте этого региона составило 10 м, основные черты подводного склона проявились очень выразительно (рис. 3). Форма подводного склона острова была четко выпуклой с перегибом на глубине 5–10 м. Как видно, перегиб происходил на меньших глубинах по сравнению с приустьевыми регионами, что обусловлено резким возрастанием продуктивности коралловых биоценозов с приближением к поверхности – зоне наивысшего фотосинтеза и вторичной биопродукции. Нижняя часть подводного склона кораллового берега на глубинах 20–30 м скорее была слабовогнутой.

Таким образом, путем статистического анализа рельефа ряда береговых регионов удалось показать, что распределение глубин определяется воздействием волнения, а также условиями питания склона наносами и условиями их потерь. Обнаружено, что время релаксации некоторых береговых систем с избыточным поступлением наносов к новому режиму после прекращения питания составляет от нескольких лет до нескольких сотен лет в зависимости от размера системы и от объема питания наносами, а также, по-видимому, и от состава наносов. Выразить аналитически эту комплексную зависимость глубины от нескольких параметров пока не представляется возможным. Однако статистическая связь глубины с кумулятивным распределением площадей их распространения определенно устанавливается. Обратим внимание на то, что если исключить из общего рассмотрения приустьевые области, то при использовании логарифмической шкалы функция зависимости глубины от интегральной площади становится линейной (рис. 4). Поиски соответствующего аналитического выражения привели к заключению, что оно может быть аппроксимировано уравнением:

$$\lg H = 0,82 \left( \lg \sum_0^H S \right)^{0,82},$$

где  $H$  – глубина,  $\sum_0^H S$  – кумулятивный процент площади подводного склона в диапазоне глубин от 0 до  $H$ .

Отклонение вычисленных значений от измеренных соотношений не превышает 0,02.

Полученное соотношение полностью соответствует режимным функциям распределения высот волн в океане [9], как и закону распределения волновых орбитальных скоростей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
2. *Леонтьев О.К.* Основы геоморфологии морских берегов. М.: Изд-во МГУ, 1961. 418 с.
3. *Лонгинов В.В.* Динамика береговой зоны бесприливных морей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 379 с.
4. *Сафьянов Г.А.* Береговая зона океана в XX в. М.: Мысль, 1978. 263 с.
5. *Сафьянов Г.А.* Геоморфология морских берегов. М.: Географ. фак. МГУ, 1996. 400 с.
6. *Horikawa K. (Ed.).* Nearshore dynamics and coastal processes. Tokyo, 1988. 515 p.
7. *Komar P.D.* Beach processes and sedimentation. Prentice-Hall, 1976. 428 p.
8. *Pethick J.* An introduction to coastal geomorphology. London, 1984. 260 p.

9. Крылов Ю.М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 255 с.
10. Silvester R. Sediment movement beyond the breaker zone // Civ. Eng. Trans. Inst. Eng. Austral. 1970. V. 12. № 1. P. 63–71.
11. Сафьянов Г.А. Динамика береговой зоны морей. М.: Изд-во МГУ, 1973. 172 с.
12. Руссо Г.Е., Сафьянов Г.А., Хоравя С.Г. Влияние изъятий пляжеобразующих наносов на динамику приустьевых взморья р. Чорохи // Геоморфология. 1988. № 3. С. 66–70.

Московский государственный университет  
Географический факультет

Поступила в редакцию  
09.12.97

## DEPTH DISTRIBUTION REGULARITIES OF THE SUBAQUEOUS BANK SLOPES BUILT UP BY DRIFT SOIL

G.A. SAFYANOV

### S u m m a r y

Cartometry of 14 shorelands regions showed the main regularities of submarine slope depths. In the presence of drifting silt loads and lack of their supply from the land, depth distribution is fitted by logarithmic function. This corresponds to the mode functions of wave height distribution and of orbital wave velocities. Relaxation of some coastal systems in response to changes of supply takes from several years to hundreds of years.

УДК 551.435.1(470.32)

© 1999 г.

В.Г. ЩЕПИЛОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСЧЛЕНЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ

### Введение

В сельском хозяйстве проведение различных изысканий, проектирование систем земледелия, перенос проектов в натуру и их реализация, оценка урожая сельскохозяйственных культур и продуктивности агроландшафтов в целом неизбежно сопряжены с использованием морфометрических показателей рельефа. Система морфометрических показателей многосторонне характеризует объект [1]. И все же для целей ландшафтного земледелия и оценки эрозионной опасности территорий, на наш взгляд, ведущей морфометрической характеристикой является густота долинно-балочной сети.

С.И. Сильвестров [2] при разработке эрозионного коэффициента определил тенденции прямой зависимости местного базиса эрозии от уровня горизонтального расчленения территории. Аналогичные данные получены в Курской области [3], согласно которым глубина балок может изменяться в зависимости от расчлененности территории. Л.Е. Сетунская [4], оценивая в баллах длину линий стока, уклоны, характер угодий, тем самым синтезировала уровень эрозионного расчленения территории.

В условиях лесостепного ландшафта Среднерусской возвышенности байрачные леса и сопряженные с ними небольшие присетевые участки насаждений занимают 85% лесопокрываемой площади. Таким образом, пространственное размещение лесов является в определенной степени индикатором густоты балочной сети. В Центральнoчерноземной зоне имеется богатый опыт полесозащитного лесоразведения. Некоторые уникальные объекты лесных полос утвердились как грандиозный географический эксперимент [5]. Статус уни-