

ПРОЦЕССЫ И СКОРОСТИ АБРАЗИИ ПОДВОДНОГО СКЛОНА В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ МОРЕЙ

Ю. Д. Шуйский*

Как известно (Зенкович, 1962; Лешинтьев и др., 1975), в береговой зоне морей и океанов широко распространены бенчи — мелководные поверхности коренного дна, лишенные покрова наносов или покрытые настолько тонким слоем наносов, что он полностью приходит в движение во время штормов. В подавляющем большинстве случаев бенчи расположены напротив активных клифов, и развитие этих абразионных форм взаимосвязано.

Основным результатом развития клифов является их отступление в горизонтальном направлении при совместном действии морских волн и неволновых факторов. Волновая абразия всегда приводит к увеличению крутизны клифов, а выполаживание береговых склонов всегда происходит в связи с действием неволновых факторов (силы тяжести, плоскостного и линейного смыва, морозного выветривания и пр.). Одновременно с отступанием клифов расширяется полоса бенчей, и главным результатом их развития является углубление, т. е. отступление в вертикальном направлении. Разнонаправленность и участие различных факторов при выработке клифов и бенчей представляется одним из принципиальных различий развития этих двух взаимосвязанных форм абразионного рельефа в береговой зоне.

Углубление бенчей происходит при наиболее весомом участии волнового фактора. В сравнении с площадью полосы волнового подрезания поднижья клифа, площади бенчей намного больше, а потому и концентрация волновой энергии на них меньше. В этой связи скорости волнового вреза в основание клифов в общем больше, чем скорости углубления бенчей.

Само по себе механическое движение прибрежных вод явно недостаточно для активного развития бенчей, как показали натурные наблюдения, лабораторные эксперименты и аналитические расчеты (Зенкович, 1962; Сафьянов, 1973). Несравненно более эффективным является абразивное действие обломочного материала, перемещаемого течениями и прибойным потоком по поверхности коренного дна. Механизм абразионного процесса при участии движущихся частиц обломочного материала в общем виде представлен в работе Г. А. Сафьянова (1973). Однако, до сих пор в литературе очень мало внимания уделено изучению оптимального количества наносов, достаточного для поддержания высоких скоростей шлифовки поверхностей коренных пород на дне.

* Профессор Одесского Государственного Университета им. И. И. Мечникова.

В этом отношении представляют интерес публикации *В. С. Гамаженко* (1956) и *Н. В. Есина* и *М. Т. Савина* (1977). Они пришли к выводу, что на крутых подводных склонах, покрытых галечными наносами, активная выработка бенчей происходит в том случае, если средняя толщина слоя наносов в приурезовой полосе не превышает 30—40 см. Таким образом, количество наносов не превышает 18—20 м³/м или 50 т на 1 пог. м длины берега при объемном весе наносов 2,5.

На менее крутых берегах, окаймленных песчаными и песчано-ракушечными пляжами (например, на Черном, Азовском, Балтийском морях) самые высокие скорости абразии бенчей в приурезовой полосе обеспечиваются такими запасами наносов, при которых толщина слоя наносов не превышает 50—70 см, а их количество — 15 м³/м или 30 т/м при объемном весе — 0. Отсюда следует, что на крутых подводных склонах, в отличие от умеренно крутых, обеспечивается наиболее активная абразия несколько большим объемом наносов (на 10—20%) существенно большим весом наносов (на 30—40%). Такое явление можно связать с повышенными значениями удельной энергии разрушающихся волн над приглубыми подводными склонами и более высокой гидравлической крупностью галечных наносов.

Если количество наносов ненамного превышает указанное выше, то создается эфемерный защитный покров лишь в отдельные отрезки времени активизации гидродинамического фактора, например, во время штормового осенне — зимнего периода. Так, юго — западнее Одесского залива на Черном море при средних объемах наносов в приурезовой полосе дна, равных 40—50 м³/м, в течение летнего сезона постоянно залегает слой наносов на подводном склоне. Зато зимой песчаные наносы залегают пятнами и их сплошной покров отсутствует. Поэтому углубление дна происходит во время частых и продолжительных осенне-зимних волнений, и на таких участках донная абразия носит сезонный характер (*Шуйский*, 1977).

Интенсивность процессов абразии бенчей по пространию береговой линии меняется в связи с различным геологическим строением побережья. С уменьшением прочности горных пород темпы абразионного вреза в общем возрастают, и эта закономерность иллюстрируется классификацией горных пород по степени сопротивляемости абразии (*Леонтьев*, 1961; *Шуйский*, *Симеонова*, 1976).

Максимальные скорости донной абразии отмечены на поверхности бенчей, сложенных рыхлыми осадочными породами (*Шуйский*, 1976; *Клюев*, 1965, 1970; *Есин*, *Савин*, 1974; *Орвику*, 1965; *Kirk*, 1977). В приурезовой части дна они могут достигать 0,7—0,8 м/год, а в отдельные сильные штормы — до 2 мм/час. При повышении прочности пород эти скорости становятся более низкими. Так, углубление приурезового дна Чукотского моря, сложенного выветрелыми глинистыми известняками, может достигать 20—25 мм/год (*Огородников*, 1977), мергелистыми известняками в прибрежной части Черного моря, Болгария, — до 30—35 мм/год (*Симеонова*, *Есин*, 1972), третичными аргиллитами и известняками у берегов Новой Зеландии — од 2—7 мм/год (*Kirk*, 1977), выветрелыми кристаллизованными известняками неогена у Тарханкутского полуострова на Черном море — до 2—3 см/год. Несколько ниже скорости донной абразии отмечены на бенчах, сложенных флишевыми толщами (*Гамаженко*,

1956; *Есин, Савин, 1977; Огородников, 1977*); там эти скорости достигают 10—15 мм/год, хотя в среднем они превышают нескольких мм/год.

Изверженные кристаллические породы на подводном склоне практически не абрадируются (*Зенкович, 1937, 1962*), хотя на отдельных участках и прослеживается очень углубление бенчей (до 1—3 мм/год). Примером могут служить некоторые мысы на Балтийском море, в Гудзоновом заливе и в море Бофорта (*Bigd, 1976*), а также поверхность абразионной террасы на Кара—Двре, Черное море (*Захаржевский, 1968*). Вероятно, такие частные случаи связаны в основном с движением большого количества гравийно-галечных наносов вокруг мысов, перед которыми находятся горизонтальные мелководные бенчи, или с сильной выветредестью пород.

С увеличением прочности горных пород, слагающих бенчи, ширина зоны их активной шлифовки и целом сужается. Так, глинистые бенчи северо-западной части Черного моря абрадируются до глубин 12—15 м/расстояние от береговой линии до 2 км), песчано — глинистые бенчи моря Лаптевых — до глубин 8—10 м/ширина зоны до 5—6 км). В то же время активная абразия на известняковых бенчах (районы Бакальской косы и м. Евпаторийского на Черном море, полуострова Каикюра в Новой Зеландии) проявляется до глубин 6—8 м при сходных уклонах подводного склона около 0,038—0,040. Если же на подводном склоне имеют место разные уклоны, а бенчи сложены аналогичными по прочности горными породами, то ширина зоны активной абразии больше на менее приглубых берегах. В частности, на румынском побережье Черного моря (район порта Мангалия), сложенного кристаллизированным известняком сармата, ширина бенчей составляет около 140—180 м (уклоны 0,077), а по наблюдениям. *В. С. Гамаженко* на Кавказском побережье Черного моря, сложенном близким по прочности флишем, — до 65—70 м (уклоны 0,11), хотя в середине показатели волнового режима в указанных районах в общем мало отличаются. Согласно приведенным данным, можно считать, что на скорости абразии бенчей оказывают влияние прежде всего физико-механические свойства и состав горных пород. И только в пределах бенчей, расположенных в разных местах, но представленных похожими по прочностным свойствам горными породами, на темпах донной абразии более заметно сказываются другие факторы, такие, как например уклоны подводного склона, запасы наносов, характер волнового режима и др.

При анализе скоростей абразии бенчей важно учитывать возможность неравномерности этих скоростей во времени. Бывает, что исследования темпов углубления бенчей показывают дециметры в год или миллиметры в год, в зависимости от прочности пород и других причин. Однако, это не значит, что полученные скорости можно распространять на десятки, сотни или тысячи лет, поскольку конкретный ход темпов абразии в значительной мере связан со стадией развития, на которой находится тот или иной участок береговой зоны.

Скажем, наблюдения проводятся на стадии максимально выраженных «противоречий» между волновым режимом и формой профиля подводного склона. Такие ситуации могут возникнуть при очень быстром затоплении участка суши (например, берега водохранилищ), при формировании вулканических островов (*Ноггман, 1976*), или смещении блока побережья под воздействием тектонических сил (*Лешинтьев, 1961*). На прежних порых скорости абразии в этих случаях являются повышенными. Но со временем они постепенно снижаются,

по мере выработки профиля равновесия (Шуйский, 1976а). Учитывая, что прибрежно-морские процессы развиваются в целом по экспоненциальному закону в пределах определенного временного ритма, необходимо иметь ввиду их общее затухание во времени. Но если данный ритм является составной частью ритма более высокого порядка и подчинен ему иерархически, то экстраполировать полученные данные необходимо в соответствии с закономерностями развития более высокого порядка.

Далее, второй случай неравномерного распределения скоростей абразии во времени связан со стадийностью проявления волнового режима (Шуйский, 1976а). Все прибрежно-морские процессы, в том числе и абразионные, во времени развиваются ритмично — в зависимости от колебаний ветро — волнового режима и ряда других экзогенных факторов. Формируется ход природного процесса саморегулирующийся, с отрицательной обратной связью, потому основным свойством такого хода является повторение сходных природных ситуаций в рамках ряда ритмов одного и того же порядка, например, в пределах внутригодового, многолетнего, внутривекового ритмов. В общем повышенные скорости абразионных процессов через определенный интервал чередуются с пониженными скоростями, и такая ритмичность обычно описывается в первом приближении синусоидальным законом. В действительности в природных условиях ритмичность является более сложной, однако, это не меняет тенденции неравномерности скоростей абразии во времени. Зная подобные закономерности, можно выяснить, на какой стадии того или иного ритма проведены измерения скоростей абразии, а значит, — определить, в какой степени повышенными или пониженными относительно средних являются полученные результаты и распространить их на длительные промежутки времени.

Третий случай неравномерности скоростей абразии бенчей связан с влиянием различных аккумулятивных форм и обусловлен различной способностью генетически связанных абразионных и аккумулятивных форм реагировать на волновое воздействие. Многочисленные примеры подовного взаимодействия по простиранию береговой линии приведены в работах В. П. Зенковича (1962), К. А. М. Линг (1963), О. К. Леонтьева с соавторами (1975) и других исследователей. Подробно механизм этого процесса Л. Г. Никифоровым (1971) на примере челекенской динамической системы (Каспийское море), а также нами на примерах Самбийского полуострова (Балтийское море) и района м. Бурнас на Черном море (Шуйский, Шевченко, 1975). Подовного рода взаимодействие происходит и по поперечному профилю подводного склона — в результате его изучения удалось разработать модель развития абразионного профиля береговой зоны (Шуйский, 1976).

Если абразионная форма сопряжена с аккумулятивной, то при поступлении наносов с аккумулятивной формы на соседний абразионный участок скорости углубления бенчей понижаются. Максимальными они являются при длительном отсутствии поступлений наносов. В процессе такого взаимодействия формируется контур береговой линии. Отличие развития бенчей на таких участках состоит в том, что здесь существует 50% вероятность частоты замедления абразии, но в то же время чаще, чем обычно на других участках береговой зоны, проявляется абразивный аффект движущихся наносов.

Изменения скоростей абразии на поперечном профиле подводного склона контролируется также изменениями его уклонов. При достаточном крутых укло-

нах наносы «стягиваются» с пляжей на подвднный склон и скорости абразии бенчей в целом снижаются, при выработке достаточно широкой абразионной террасы наносы начинают двигаться преимущественно со дна к подножью клифов, формируются широкие длажи, прибрежная часть дна покрыватзся слом наносов, а на остальной части бенчей скорости углубления повышаются. Наблюдения в каждую из этих стадий развития поперечного профиля двдут неравнозначные результаты о темпах абразии.

Если абразионный врез осуществляется в рыхлые гли — нистые породы, содержащие незначительное количество пляжеобразующего материала, а подвднный склон является очень отмелым (уклоны 0,001—0,007), то абразии подввергается наиболее заметно лишь прурезовая часть дна. Из-за глубокого дефицита наносов пляжи образоваться не могут, а если формируются, то только в вершинах вогнутостей берега и небольших размеров. Поэтому приурезовая часть дна до глубин 1—1,5 м и клиф постоянно разрушаются, несмотря на очень широкие (сотни и даже тысячи метров) абразионные террасы перед берегом. В этом случае не вся поверхность подводного склона абрадируется, и это одна из особенностей бенчей перед очень отмелыми берегами.

Все приведенные здесь случаи отражают влияние различных факторов на развитие бенчей — геологического строения, изменений гидрометеорологического режима, уклонов подводного склона, конфигурации береговой линии и др., которые в конечном итоге влияют на соотношение отделбных элементов баланса наносов. Последние, в свою очередь, определяют темпы абразии бенчей. Особенно ярко такое влияние выражается на тех участках береговой зоны, в пределах которых определяющим является абразионное питание наносами.

Фактором, который коренным образом отличает динамику различных бенчей, является их геологическое строение. По современным представлениям (Леонтьев, Никифоров, Сафьянов, 1975; Сафьянов, 1973), развитие бенчей, сложенных несвязными или славо связными осадочными породами (V—IV) классы по степени сопротивляемости абразии), определяется преимущественно волновым фактором. Практически все такие бенчи в целом и отдельные формы на них имеют волновую природу.

С увеличением прочности горных пород, слагающих бенчи, снижается доля влновых скульптурных форм рельефа и во все большей мере выражаются структурные формы, как например на Мурманском берегу Баренцева моря (Зенкович, 1937) или на Кавказском берегу Черного моря (Есин, Савин, 1977). Если породы представлены относительно проч ными осадочными и некоторыми сильно выветрелыми скальными, относящимися к Ш—II классам по степени сопротивляемости абразии, то на сложенных ими бенчах определяющее значение приобретают неволновые структурные формы. Гидрогенные факторы часто лишь препарируют их, сглаживая или углубляя. Такие бенчи менее динамичны, чем сложенные рыхлыми слабосвязными породами, а следовательно на них лучше сохраняются черты неволнового рельефа.

Горные породы I класса по степени сопротивляемости абразии в минимальной мере подвержены волновому воздействию, хотя есть указания на относительно высокие темпы их углубления — до 1—2 мм/год. (Bird, 1976; Hills, 1971; Kirk, 1977). Поэтому большинство факторов практически не оказывают влияние на их развитие; главным условием проявление абразии здесь является наличие ровных горизонтальных поверхностей в приурезовой полосе. Задер-

живающиеся на таких участках гравийно-валунные наносы способствуют образованию микроформ шлифовки (Зенович, 1937; Ahlman, 1916 Ljunger, 1930).

Разнообразие динамики бенчей на подводном склоне береговой зоны дает возможность расчленить их на типы. Одна из новейших типизаций бенчей разработана О. К. Леонтьевым с соавторами (1975). Структурные особенности пород на дне принимаются в качестве основного типизационного критерия, соответственно выделяются 6 типов бенчей: грядовый, ступенчатый, выровненный, щебенчато-глыбовый, погребенный и валунно-глыбовый. Определения перечисленных бенчей показывают, что принятый ими качестве основного принцип не выдерживается. Так, первые три типа отражают особенности рельефа, связанные со структурными чертами пород. Погребенный выделен в соответствии с процессами осадконакопления; как бенч он не развивается в настоящее время. Щебенчато-глыбовый характеризуется залеганием на поверхности подводного склона глыб и щебня, но как на нем протекают процессы абразии, авторы не объясняют. Если глыбы и щебень полностью покрывают поверхность коренных пород, то это тот же погребенный бенч, — нет разъяснений и на этот счет. Наконец, валунно-глыбовый бенч по сути представляет собой разновидность щебенчато-глыбового, но выработан он не в скальных, а в рыхлых осадочных породах с включениями глыб и валунов. Такие бенчи являются новообразованиями, и при их окончательном формировании волновому воздействию подвергается не исходная поверхность первичных пород, а неровная скальная поверхность крупных обломков с преобладанием процессов волновой шлифовки. Таким образом, принятый типизационный критерий выдерживается здесь непоследовательно, и структурные особенности в основном характеризуют морфологические особенности бенчей, а процессы динамики каждого из типов не рассмотрены.

Повидимому, данная типизация бенчей, разработанная О. К. Леонтьевым и др. (1975), является недостаточно представительной для объяснения современных процессов развития бенчей. Она может объяснить особенности рельефа подводного склона, но не характеризует прибрежно-морских процессов, не дает представления о том, какие факторы участвуют в формировании бенчей. А ведь именно с процессами связаны ведущие генетические разновидности бенчей, и именно особенности динамики могут указать на такой важный момент, как роль бенчей в поступлении терригенного обломочного материала в береговую зону; рассмотрение динамики подводного склона дает возможность получить данные о темпах его углубления, о ширине и характере современного развития. Поэтому представляет интерес попытка динамической типизации бенчей.

Вероятно первая такая попытка была предпринята Х. В. Альманом (Ahlman, 1916), который выделил несколько разновидностей процессов формирования бенчей на поверхности кристаллических пород. Отличие одной разновидности от другой определяется тем, что горные породы обладают разным сложением, разной степенью выветрелости и трещиноватости, а потому неоднозначно реагируют на действие волн, колебаний температур воздуха и воды в приурезовой полосе. Всево В. Альманом различались две большие группы — выламывания и шлифовки. Формы выламывания увязывались с горизонтальной слоистостью пород, и отдельные слои расчленились на отдельные вертикальными трещинами. Замерзание воды приводит к расширению трещин, откалыванию плитчатых обломков, которые затем удаляются волнами. Фор-

мы шлифовки связаны с массивной структурой пород. В местах пониженной прочности на поверхности таких пород галькой или валунами вышлифовываются углубления, которые в определенных условиях могут развиваться в желоба, эвразийные «котлы» или «вакны».

В дальнейшем эта типизация была развита Е. Льюнгнером (*Ljungner*, 1930) на примере юго-западного побережья Швеции и В. П. Зенковичем (1937) на примере Мурманского побережья. Эти авторы показали, что существует большое разнообразие форм выламывания и шлифовки на берегах, сложенных прочными кристаллическими и метаморфическими породами, например, такие, как «колонны» и «выпуклости» (положительные), разные желоба, ямы, ванны, коыга и пр. Е. Льюгнер подчеркивал, что шлифовка поверхностей бенчей песком практической роли не играет, главным абразивным материалом для прочных пород являются валуны и галька. Этот автор различал два процесса — истираемость и шлифовку; шлифовке подвергаются поверхности бенчей, а истираться может только абразивный материал, движущиеся наносы.

В. П. Зенкович (1937) показал, что формы выламывания в меньшей степени связаны с действием волнового потока и течений и в большей с процессами выветривания, в том числе подводного в условиях приливо-отливных явлений. Развитие форм выламывания приводит к пополнению береговой зоны обломочным материалом, тем, который своей абразивной работой создает формы шлифовки. При этом важным условием является наличие горизонтальных или близких им поверхностей в зоне действия прибоя. Одновременно исходные обломки горных пород истираются и мелкоземный материал истирания в виде взвеси уходит на большие глубины, представляя собой один из источников питания донных осадков.

В основу предложенной ниже динамической типизации бенчей положены разработки Х. В. Альмана, Е. Льюнгнера, В. П. Зенковича. В последние годы было подтверждено многочисленными примерами (Зенкович, 1962; Кинг, 1963; Сафьянов, 1973; и др.), что абразия многолика. Не только на берегах, но и на подводном склоне, где бенчи сложены разными породами, волновой фактор способствует развитию процессов истирания, высверливания, выламывания и др. при участии хемогенных, биогенных, криогенных явлений. Соответственно предлагается различать следующие типы бенчей.

Бенчи истирания. Развита в условиях, при которых поверхность прибрежного дна является пологой, монотонно опускающейся в сторону моря, очень слабо расчлененной, обеспечивающей постепенное расходование волновой энергии, относительно однородное поле скоростей течений, достаточных для активного перемещения наносов. Запасы наносов близки к оптимальным, их состав характеризуется преобладанием галечных, гравийных, крупнопесчаных фракций, а также ракуши. Распространены на поверхности прибрежного дна, сложенного однородными по прочности горными породами, которые обеспечивают активную абразию. Нередко в пределах распространения этого типа бенчей скорости углубления повышены, что приводит к высокой их продуктивности как источника терригенного обломочного материала. С другой стороны, интенсивным является истирание наносов и поступление взвеси в открытое море. Таким образом, для береговой зоны с бенчами истирания характерны высокие величины продуктивности терригенными обломками пелитовых размерностей.

Ведущим процессом является плоскостная абразия, способствующая в целом равномерному понижению поверхности бенчей. Нередко распределение скоростей абразии по поперечному профилю дна связано с изменениями уклонов, — на положительных формах и участках более крутого отрезка профиля скорости могут быть выше, чем на отрезках пониженной крутизны (Шуйский, 1976б). Бенчи данного типа развиваются обычно выровненных или зубчатых абразионных берегов, или в абразионных вогнутых дугах большого радиуса.

В береговой зоне, где дно сложено осадочными скальными трещиноватыми породами карбонатного состава, с пологим падением слоев в сторону моря, часто по линиям трещин создаются поперечные и продольные углубления-желоба. На таких бенчах наносов, как правило, очень мало, они грубообломочные. Реверсивно двигаясь по углублениям, они вырабатывают канавки и желобки. Линейное истирание бенчей по трещинам с помощью крупных обломков приводит к вертикальному расчленению пород на отдельные илиты. Затем происходит выламывание расчлененных илит, они сами или их обломки пополняют наносы береговой зоны, а поверхность бенчей покидается. Эта разновидность бенчей истирания имеет много общего с другим типом — бенчами выламывания (см. табл. 1).

Таблица 1

ДИНАМИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ БЕНЧЕЙ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ МОРЕЙ

№ п/п	Типы бенчей	Группы типов бенчей
1.	Истирания	Гидрогенные
2.	Высверливания	
3.	Выламывания	
4.	Размыва (эрозионные)	
5.	Селективно-абразионные	
6.	Растворения	Хемогенные
7.	Фитогенные	Биогенные
8.	Зоогенные	
9.	Ледового выпаживания	Криогенные
10.	Термоабразионные	
11.	Первичного расчленения	Тектогенные

Бенчи высверливания. Распространены на подводном склоне, сложенных породами практически любой прочности, но в наибольшей степени — II—IV классов по степени сопротивляемости абразии. Главным условием развития таких является локальная, «пятнистая» неоднородность породы, в особенности при ее массивном отроении (Леонтьев и др., 1975). Тогда образуются участки убыстренного истирания, в которые попадают крупные обломки породы, испытывающие вращательное движение под влиянием вихрей воды. В итоге формируются эвразионные углубления разного диаметра и разной глубины. Из других условий заметное место занимают: сравнительно пологая поверхность бенча, небольшие запасы наносов на дне, преобладание грубообломочного материала, развитие высоких скоростей течений и прибойного потока. Наи-

более благоприятными условиями развития бенчей высверливания характеризуются участки береговой зоны приливных морей.

Бенчи высверливания развиты главным образом на дне, сложенном скальными породами, реже — глинистыми породами. На очень отменных подводных склонах (уклоны около 0,007—0,01), сложенных глинами или суглинками, встречаются высверливания, глубиной до 25—40 см и в диаметре 1,5—3,0 м. Высверливающими элементами могут быть плоские крупные обломки известняка, песчаника, сланца или крупные карбонатные стяжения, вымываемые глины.

Механизм понижения поверхности бенчей высверливания достаточно полно освещен в литературе (Зенкович, 1962; Леонтьев, Никифоров, Сафьянов, 1975; Сафьянов, 1973).

Бенчи выламывания. Распространены на дне, сложенном выветрелыми, сильно трещиноватыми породами. Породы быть скальными и глинистыми, с ярко выраженной слоистостью, когда малопрочные слабосцементированные прослойки чередуются с более прочными. Процессу выламывания обломков породы благоприятствуют высокие величины волновых давлений (в условиях относительно приглубокого подводного склона), быстрое удаление обломочного материала, неровная поверхность дна, а в условиях приливных осушек в полярных широтах — еще и частая смена положительных и отрицательных температур.

Очень часто в делювиальных, озерных, дельтовых рыхлых отложениях, слагающих бенчи, глинистые прослойки чередуются с тонкими прослоями песков, супесей или илов. Выламывание более прочных глинистых разностей возможно при вымывании менее прочных. Отрыву обломков благоприятствует компрессионный эффект при разрушении волн или удары частиц наносов, подхваченных волнами и течениями. На скальном дне выламывание происходит по линиям трещин практически только под ударами отдельных обломков породы. (Selwood, Coe, 1964). Часто трещины расширяются и углубляются процессами истирания. В отличие от бенчей истирания, понижения дна на бенчах выламывания является скачкообразным — вначале идет подготовка к отрыву очередного обломка и поверхность дна остается неизменной, а затем происходит отрыв обломков во время очередного шторма и бенч углубляется.

На некоторых участках бенчей данного типа убыстрению процессов выламывания способствуют водорсли, например, филлофора. Во время штормов веточки бентосных растений играют роль своеобразного «паруса», который, подхваченный течением или волной, увеличивает отрывающие усилия в несколько раз.

На некоторых участках бенчей данного типа убыстрению процессов выламывания способствуют водорсли, например, филлофора. Во время штормов веточки бентосных растений играют роль своеобразного «паруса», который, подхваченный течением или волной, увеличивает отрывающие усилия в несколько раз.

Вероятно, что бенчи выламывания развиваются в тех случаях, когда процесс истирания происходит значительно медленнее процесса выламывания, а условия для процесса высверливания неблагоприятны.

Бенчи рахмыва (эрозионные). Наблюдались нами только на очень отменном (0,001—0,006) подводном склоне, сложенном глинистыми породами. Ширина таких бенчей может достигать нескольких километров, как например у восточных берегов Азовского моря, в вершине Каркинитского залива Черного моря,

у западных берегов Эстонии на Балтийском море. В условиях подобных участков береговой зоны гашение волн открытого моря происходит далеко от берега, и абразии способствуют сильные сгонно-нагонные течения, распространяющиеся в основном вдоль берега. Под влиянием течений вырабатываются неглубокие (до 30—50 см) и широкие ложбины, простирающиеся вдоль берега. Изменения скоростей, продолжительности и направлений течений от шторма к шторму, волновое воздействие нагонах приводят к размыву междулоббинных валов. В итоге понижается поверхность дна.

Скорости абразии на эрозионных бенчах являются минимальными, в пределах тех участков подводного склона, где залегают глинистые породы.

Селективно-абразионные бенчи. Хотя селективная абразия проявляется и на других типах бенчей, в данном случае именно она приводит к качественно новому характеру развития и выражена наиболее четко. Связана эта четкость с резко различной прочностью глинисто-песчаных отложений и включенных в них крупных обломков скальных пород (кристаллических изверженных и осадочных метаморфических). Этот тип бенчей встречается тогда, когда подводный склон сложен моренными, деллювиальными и горно-аллювиальными отложениями, в составе которых значителен процент крупнообломочного материала. Подводный склон может быть разной крутизны — от малой, как, скажем, в Рижском заливе Балтийского моря (уклоны около 0,002) до значительном, как например у берегов Самбийского полуострова на том же море.

Селективная абразия приводит к более скоростям разрушения бенчей на участках залегания рыхлых отложений. Поэтому вместе с их размывом происходит выстувание над поверхностью дна крупных скальных обломков. В таком виде развитие бенча может стабилизироваться, и в дальнейшем его углубление определяется скоростью истирания поверхностей скальных пород.

Перечисленные здесь пять типов бенчей развиваются с активным участием волн и сопровождающих движений прибрежных вод. Поэтому их можно отнести к группе гидрогенных. Вместе с тем в природе существуют и другие бенчи, формирование которых зависит в основном от неволновых факторов, хотя волны также участвуют в развитии таких бенчей.

Бенчи растворения. Формирование связано с влиянием хемогенного фактора. Распространены на поверхности горных пород, поддающихся растворению, в частности, карбонатных (известняки, мергели, доломиты и пр.), и в условиях относительно невысокой активности прибрежных вод. В природе такие бенчи чаще всего встречаются на очень пологих широких отмелях, а также на очень крутых подводных склонах (Зенкович, 1962; Никифоров, 1966; Russel, 1967).

Важнейшим условием формирования бенчей растворения является существование гидрохимического градиента в придонном слое воды (Сафьянов, 1973). На него оказывают влияние: слоеность и температура воды, насыщение ее углекислотой, химический состав породы и ее растворимость, скорости течений и другие причины. Результатом химического влияния является формирование лунок разбедания, котлов выщелачивания, самой различной формы карров, форм «ситового выветривания», останцев выщелачивания и др., которые в целом приводят к понижению поверхности бенчей. Скорости углубления дна здесь обычно составляют 0,5—5,0 мм/год. Так, например в известняках Больших Багамских островов углубление бенчей растворения составляет

0,5—1,0 мм/год, в районе м. Ру (Эстерель) во Франции — около 1,8 мм/год, около берегов Югославии до 2—3 мм/год, у берегов полуострова Тарханкут — примерно 1—4 мм/год.

Фитогенные бенчи. Развиваются под влиянием растворяющего действия корневой системы водорослей. Редкая разновидность бенчей. Встречаются в условиях отмолых берегов с очень слабым влиянием волнового фактора. Встречен в Каркинитском заливе Черного моря и у м. Калиакра. Описан К. Пойзатом (Poizat, 1970) в заливе Габес. На атолле Алдабра фитогенные бенчи занимают более 50% площади подводного склона (Taylor, Way, 1976). Количественных данных о темпах углубления бенчей этого типа не имеется.

Зоогенные бенчи. Являются распространенными в береговой зоне. Чаще всего встречаются на поверхности пород карбонатного состава. Главную роль в их развитии играют камнетонцы, причем, одна группа камнеточцев производит механическое сверление (например, *Folas*), а другая — химическое воздействие (например, *Cliona*, *Barnea*, *Chiton*).

Скорости углубления зоогенных бенчей на порядок выше скоростей растворения. Так, известно (King, 1963), что на восточных берегах Англии сверлящие моллюски углубляют поверхность бенчей, сложенных мергелистыми известняками, на 1,25—1,50 см/год. На подводном склоне Черного моря моллюски *Barnea candida* разрушают поверхность мергелистых глин на 3—6 см/год (Зенкович, 1962). На бенчах вокруг атоллов в тропической зоне поверхность известняков стачивается моллюсками *Chiton*, в результате дно углубляется на 1,7—3,8 см/год (Taylor, Way, 1976).

Фитогенные и зоогенные бенчи объединяются группу биогенных. В их развитии, как и бенчей других типов, принимают участие гидрогенные факторы. Например, с поверхности фитогенных бенчей течениями удаляются растворенные вещества, что повышает гидрохимический градиент на границе «дно-вода». Морские волны разрушают горные породы, измененные камнеточцами.

В полярных и северной части умеренных широт в береговой зоне развиваются бенчи *ледового выпаживания*. Встречаются на участках ослабленного волнового режима, где механическое воздействие льда особенно заметно. Выработаны в основном в песчаных и глинистых породах деллювиального, аллювиального, озерного, ледникового происхождения. Скорости углубления бенчей этого типа не измерялись, но лед способен выпаживать углубления до 3—5 м и шириной в несколько сотен метров, реже — 1—2 км. Можно принять, что общая величина углубления может достигать 5—10 см/год. Основными формами, которые представляют бенчи выпаживания, являются ложбины и поверхности выпаживания.

Более распространенным типом в полярных широтах является *термоабразионный*. Эти бенчи распространены в местах залегания многолетнемерзлых пород с включениями льда. Их развитие активизируется лишь в период так называемого «гидрологического дота», когда средние суточные температуры воды становятся положительными, и связано с оттаиванием поверхности дна. Бенчи этого типа очень мелководны (уклоны дна 0,001—0,0002), широки (до 12—15 км), в их пределах довольно активно влияние течений, волны играют вспомогательную роль (Клюев, 1965). Термическое влияние вод вызывает прогревание поверхности дна, сложенного многолетнемерзлыми породами, в результате высвобождаются твердые минеральные частицы пород (составляют

до 60—60% массы мерзлых толш), которые подхватываются течениями и уносятся в места отложения вдоль берега или на большие глубины. В итоге происходит понижение дна со скоростью около 4—5 см/год, согласно данным длительных повторных промеров (Клюев, 1970). Учитывая ширину бенчей данного типа и темпы их ежегодного углубления, а также степень «льдиности», можно подсчитать, что продуктивность их терригенным обломочным материалом составляет 200—250 м³/м. год.

Бенчи первичного расчленения. Расположены в местах, где берег сложен очень прочными горными породами I класса по степени сопротивляемости абразии. Бенчами их можно назвать условно, поскольку они практически не абрадируются благодаря прочности слагающих пород и отсутствию абразивного эффекта движущихся наносов. Сохраняют форму своей поверхности такой, какой она была до вовлечения в волновую переработку. Данный тип бенчей известен на Белом море, в Гудзоновом и Баффиновом заливах, на берегах Шотландии, Шетландских, Оркнейских, фарерских островов и др. (Зенкович, 1937).

Перечисленные 11 типов бенчей, как можно видеть из краткого обзора, отличаются один от другого окружающими условиями, факторами, направленностью процессов развития. Важной характеристикой являются скорости углубления бенчей и, следовательно, их — продуктивность обломочным материалом. Наиболее продуктивными являются гидрогенные бенчи, причем, в наибольшей степени — сложенные рыхлыми и слабосцементированными осадочными породами.

Наибольшее количество терригенного обломочного материала поступает с бенчей истирания, термоабразионных, выламывания — до 200—300 м³/год, с полосы, шириной 1 м и длиной от линии уреза до глубин, на которых еще скапливается подводная абразия. С бенчей высверливания, селективно-абразионных и зоогенных поступает до 25—30 м³/м. год материала, а с бенчей ледового выпавания и размываемых — до 10—15 м³/м. год. Практически не дают обломочного материала бенчи растворения, фитогенные и первичного расчленения.