

# ПРОГНОЗ УСЛОВИЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ПЕСЧАНЫХ РИФЕЛЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ ВОЛНЕНИЕМ<sup>1</sup>

## Введение

Итог сложного и многообразного взаимодействия воды и песчаного дна в береговой зоне и на шельфе: даже в бесприливном море появление целой иерархии аккумулятивных донных форм. Созданные разными процессами, они существенно различаются и по размерам. Так, в прибрежной зоне фиксируются бары, банки и гидробарханы, горизонтальные размеры которых составляют сотни метров и километры. Убедительной представляется концепция, связывающая их образование с низкочастотными волновыми движениями и отводящая короткопериодному штормовому волнению лишь косметическую роль [1].

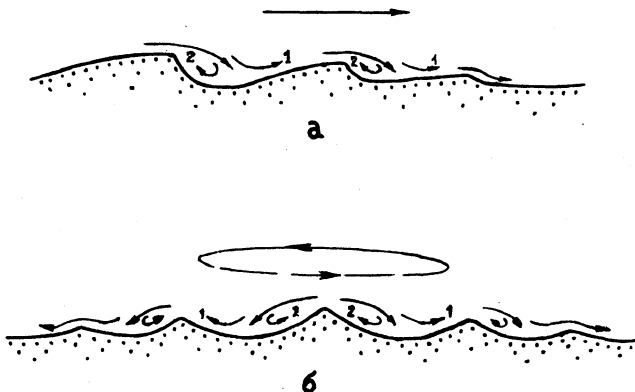


Рис. 1. Плоские вихревые рифели и структура вихрей у рифелей, образованных: а – течением, б – волнением

Формы другого порядка – береговые валы. Если на подводном склоне имеется несколько валов, то шаг между ними составляет первые десятки метров, а высота их достигает 2–3 м. Известен целый ряд гипотез их образования. Не анализируя их, отметим лишь то, что большинство гипотез не связывают происхождение валов только с орбитальным движением жидкости у дна. Эти заметно менее инерционные формы способны мигрировать в ходе шторма, но все же время их значимого изменения составляет часы или сутки.

Орбитальное же движение жидкости у дна обычно вызывает образование на песчаном дне наиболее динамичных форм (или микроформ) рельефа – рифелей. Их высоты не превосходят первых десятков сантиметров, а крутизна склонов обычно составляет 0,1–0,25. Влияние рифелей заметно лишь в кинематической структуре придонной области. Образованные волнами рифели имеют симметричную или близкую к таковой форму (рис. 1). Но рифели могут быть образованы и течением, и тогда они асимметричны (рис. 1). В океане такие типичные для речных русел микроформы обнаруживаются не только в прибрежной зоне, но и на километровых глубинах [2].

Аналогия в развитии рельефа морского и речного дна заключается еще и в том, что подобная описанной выше иерархия донных форм разных порядков существует и в речных руслах (см., например, [3]). При этом в обоих случаях возможно одновременное существование наложенных друг на друга форм разных порядков.

Ниже мы остановимся на вопросах образования наиболее часто встречающихся в береговой зоне бесприливных морей форм рельефа – песчаных рифелей волнового

<sup>1</sup> Доработка статьи выполнена при финансовой поддержке Фонда РФФИ, № 96-05-66231.

генезиса. Их зарождение связано с началом движения частиц, слагающих дно, но рифели продолжают существовать и при значительных скоростях и интенсивном взвешивании наносов. В форме движения рифелей переносится существенная часть транспортируемого материала, рифели формируют шероховатость дна и таким образом влияют и на перемещение взвешенных наносов. Сведения о расположении и параметрах ископаемых рифелей используются для динамических реконструкций.

Все это определяет интерес к условиям существования песчаных микроформ и к прогнозу их размеров. Этим вопросам посвящено множество исследований, в большинстве которых делаются попытки решения задач путем обобщения данных наблюдений. Ввиду отсутствия надежной теоретической базы взаимодействия жидкой и сыпучей сред такой подход представляется оправданным. Но, несмотря на обширную литературу, задачи еще нельзя считать решенными, при этом и высказанные мнения исследователей зачастую оказываются противоречивыми. Основная причина этого – ограниченный диапазон данных, наодившихся в их распоряжении.

Задача настоящей работы – на базе обобщения обширного массива данных наблюдений определить границы области существования наиболее распространенных в береговой зоне микроформ – рифелей, созданных неразрушенными волнами, предложить метод прогноза их параметров и обсудить возможность построения динамических реконструкций по сохранившимся формам микрорельефа дна.

Рифели разделяются на активные, т.е. сформированные ныне действующим режимом, и пассивные, т.е. сохранившиеся как след ранее действовавшего. По условиям образования выделяют невихревые и вихревые рифели. Последние в свою очередь также можно разделять на несколько типов, но такая детализация нам пока не понадобится.

Мы не будем рассматривать невихревые рифели или, как их иначе называют, рифели качения, поскольку они не играют заметной роли в формировании рельефа дна. Эти формы плавных очертаний удавалось наблюдать в лаборатории, в том числе и одному из авторов, но в натурных условиях они, насколько нам известно, зафиксированы только однажды [4]. Сведения о рифелях течения мы будем использовать лишь в качестве аналогии.

### Область существования активных рифелей

Вихревые рифели могут формироваться уже при скоростях  $u$ , близких к сдвигающим  $u_{cr}$ . Неравномерные в силу ряда причин (вариации состава, скорости и т.д.) подвижки частиц приводят к образованию на гладком дне локальных неоднородностей рельефа, за которыми возникают вихри, распадающиеся на две составляющих (рис. 1). Компонента 1, перемещая частицы на малые расстояния, работает на формирование следующего рифеля, а 2 – поддерживает крутой "подветренный" склон рифеля, сохраняя таким образом возможность существования самой формы и вихря. Если энергия компоненты 2 мала по сравнению с весом частиц, форма неустойчива и возмущения затухают, не вызывая развития деформаций. Если энергия достаточно велика, то система вихрей выстраивает устойчивую систему рифелей, и их параметры взаимно регулируются. Полнее этот вопрос рассмотрен в работах [5–7 и др.].

Как показывают результаты экспериментов авторов этих работ, в поступательном потоке, распространяющемся над гладким дном, размер, а соответственно и энергия зарождающихся вихрей изменяются незначительно. Следовательно, условия сохранения плоского дна при  $u = u_{cr}$  определяются весом частиц в воде, что и подтверждается выдержавшим проверку временем эмпирическим критерием Шабера и Шовена [8]:

$$d > d_{cr} \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho_p - \rho} \right)^{1/3}. \quad (1)$$

Здесь  $d$  – средний размер частиц,  $\rho$ ,  $\rho_p$  – плотность воды и сыпучего материала,  $\rho_s$  – плотность песка,  $d_{cr} = 0,6$  мм (отсюда легко найти и критический вес частицы в воде –  $2 \cdot 10^{-4}$  г).

Но существуют условия, при которых гладкая форма дна в поступательном потоке будет устойчивой по отношению к неким малым возмущениям и неустойчивой к сравнительно большим [7, 9].

**Основные формулы, определяющие границы области существования песчаных рифелей, образованных волнением**

| Группа, № | Автор, год, ссылка            | Появление рифелей                          | Стирание рифелей        |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| 1,1       | Kennedy, Falcon, 1965 [10]    |                                            | $D = 1,6 \cdot 10^4$    |
| 1,2       | Carstens et al., 1969 [11]    |                                            | $D = 3,4 \cdot 10^4$    |
| 1,3       | Kos'yan, Kochergin, 1990 [12] | $D = 10^2$                                 | $D = 2,5 \cdot 10^4$    |
| 2,1       | Brebner, 1980 [13]            | $\psi > 3$                                 |                         |
| 2,2       | Dingler, 1974 [14]            |                                            | $\psi > 240$            |
| 2,3       | Komar, Miller, 1975 [15]      | $\psi = 0,11D^{1/2}$ – начало формирования |                         |
| 2,4       | "                             | $\psi = 0,21D^{1/2}$ – начало движения     |                         |
| 3,1       | Nielsen, 1981 [16]            | $\theta = 4 \cdot 10^{-2}$                 | $\theta = 1$            |
| 3,2       | Horikawa, 1988 [17]           |                                            | $\theta = 5...6$        |
| 4,1       | Vongvisessomjai, 1984 [18]    | $\psi = 0,89D^{1/3}$                       | $\psi = 12,7D^{1/3}$    |
| 4,2       | Косьян, 1987 [19]             | $\psi = 3,3 \cdot 10^{-2}D^{2/3}$          | $\psi = 0,54D^{2/3}$    |
| 5,1       | Kos'yan, 1991 [20]            |                                            | $\theta = 0,17D^{0,18}$ |

Очевидно, что следствием более динамичного характера вихреобразования в осцилляционном потоке должны быть и более сложные критерии существования форм дна. Известные методы оценки условий существования рифелей, образованных неразрушенными волнами, можно разбить на несколько групп.

Одну из них составляют зависимости, в которых появление и стирание рифелей выражается связями вида

$$u_{\text{появл/стир}} = k_{\text{появл/стир}} \sqrt{gd}, \quad (2)$$

где  $k_{\text{появл}}$  и  $k_{\text{стир}}$  – постоянные или малоизменяющиеся коэффициенты,  $g$  – гравитационная постоянная.

С определенными оговорками такую структуру можно было бы принять для стационарного течения, где и скорость трогания часто определяется по аналогичной формуле. При волнении, когда воздействие на дно зависит и от периода, такие оценки будут слишком грубыми, и мы их рассматривать не будем.

Аргументами формул других групп чаще всего являются:

– величина  $D = 2a/d$ ,

– так называемый параметр подвижности частиц  $\psi = \frac{u^2 \rho}{gd(\rho_p - \rho)}$ ,

– параметр Шильдса  $\theta = \frac{\tau^2 d^2}{(\rho_p - \rho)gd^3} = \frac{0,5f_w \rho u^2}{(\rho_p - \rho)gd} = 0,5f_w \psi$ .

В этих выражениях  $a$  – орбитальный радиус движения частиц жидкости у дна,  $\tau$  – донное касательное напряжение,  $f_w$  – коэффициент донного трения.

Набор основных формул приведен в таблице, где в первые три группы выделены те, что устанавливают границы лишь по одному параметру –  $D$ ,  $\psi$  или  $\theta$  [10–20].

К четвертой и пятой группам отнесены формулы, связывающие  $D$  с  $\psi$  или  $\theta$ . Параметры  $\psi$  или  $\theta$  различаются на величину  $0,5f_w$ , которая лишь при определенных условиях остается постоянной [21]. К тому же результаты многих экспериментов представлены их авторами в виде, из которого можно получить лишь один из этих параметров, поэтому отдельный анализ формул представляется обоснованным.

Из работ, рассматривающих условия существования волновых рифелей, наибольший интерес представляют исследования Р.Д. Косьяна [4, 12, 19, 20, 22–25], который, во-первых, обобщил обширный материал лабораторных и натурных наблюдений, внося в этот банк значительный вклад штормовыми наблюдениями, а во-вторых, провел наиболее полное

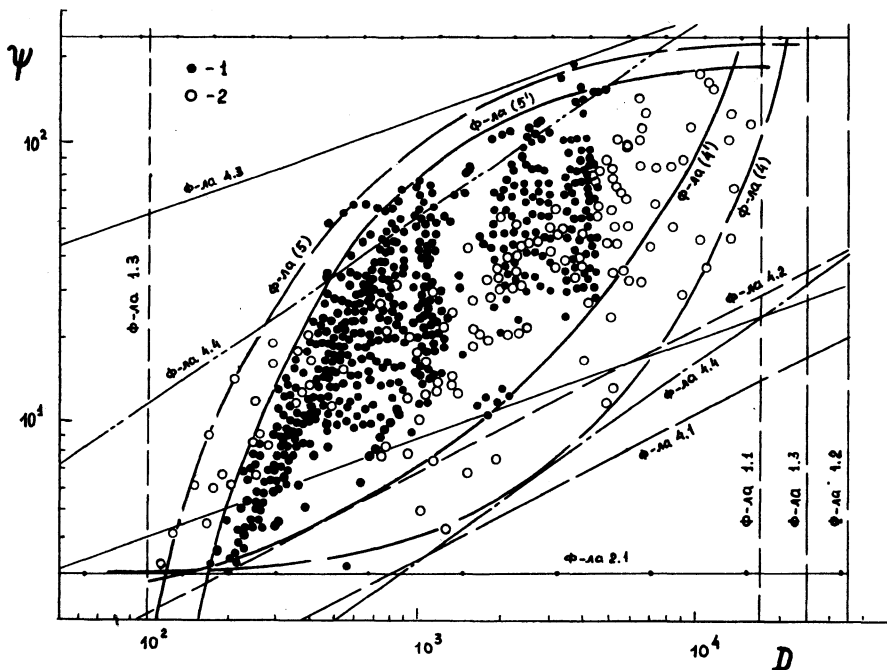


Рис. 2. Сопоставление зависимостей, ограничивающих диапазон существования рифелей по параметру  $D$  и параметру подвижности частиц наносов, с данными наблюдений

1 – лабораторные эксперименты (Анцыферов и др., 1977; Manohar, 1955; Miller, Komar, 1980; Керемедчиев; Nielsen, 1979), 2 – натурные наблюдения (Косьян, 1985; Miller, Komar, 1980; Inman, 1957; Nielsen, 1984; Tanner, 1971).

Приведенные на рис. 2 и 3 данные заимствованы из работы [7]

сопоставление данных с известными зависимостями<sup>2</sup>. Но в этих работах итоги сопоставления в координатах  $D, \psi$  приведены раздельно для лабораторных и натурных наблюдений. Однако оснований для противопоставления результатов лабораторных и натурных наблюдений не имеется. Более того, диапазоны наблюдений в значительной мере перекрываются и дополняют друг друга, и представленные совместно результаты (рис. 2) позволяют сделать более полные выводы.

Из анализа данных, приведенных на рис. 2 и 3, следует, во-первых, что принятая многими авторами, в том числе и Р.Д. Косьяном, линейная или степенная связь – не универсальный вид аппроксимации границ поля. Более удачным представляется его решение в виде эллиптической аппроксимации [20, 22] (рис. 3)

$$0,23 \ln D - 0,26 \ln \theta + 0,06 \ln D \ln \theta - (0,11 \ln D + 0,17 \ln \theta) = 1, \quad (3)$$

которое легко можно было бы построить и в координатах  $D, \psi$ . Во-вторых, данные натурных наблюдений занимают более широкое поле, чем данные лабораторных. Это объясняется большим количеством влияющих факторов в первом случае, определенной сложностью установления того факта, что наблюдаемые на дне природного водоема рифели соответствуют действующему волнению, а не унаследованы от предшествовавшего режима или находятся в стадии перестройки, меньшей точностью измерения самих параметров микроформ в натуре.

Исходя из этого, жесткие границы появления/стирания рифелей целесообразно устанавливать лишь для лабораторных экспериментов. А для натурных условий следует признать возможность существования переходных зон, внутри которых форма дна будет

<sup>2</sup> Для натурных наблюдений взяты характеристики "значительных", средних из трети наиболее крупных в серии волн.

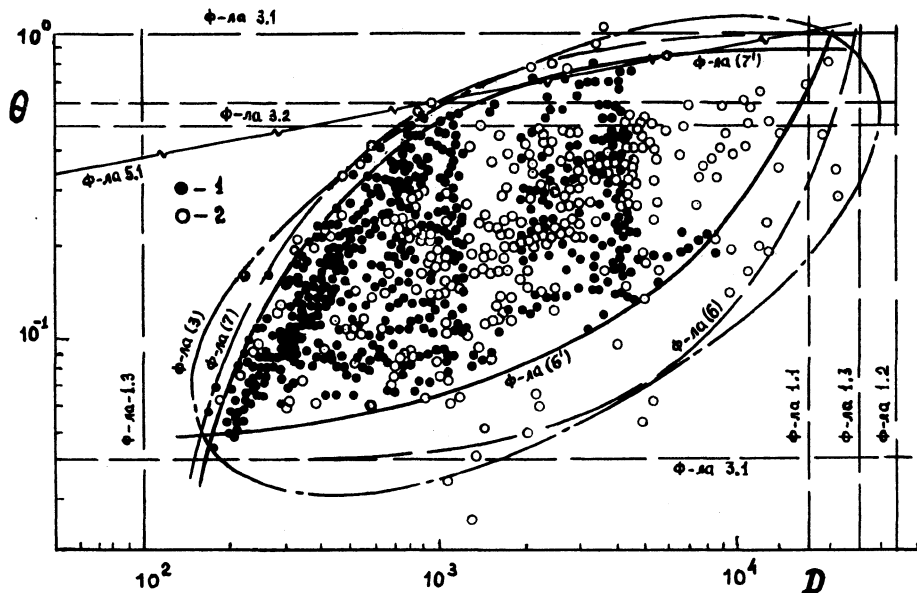


Рис. 3. Сопоставление зависимостей, ограничивающих диапазон существования активных рифелей по параметру  $D$  и критерию Шильдса, с данными наблюдений

1 – лабораторные эксперименты (Керемедчиев; Manohar, 1955; Nielsen, 1979), 2 – натурные наблюдения (наблюдения Р.Д. Косьяна в международных экспериментах Камчия-78, Шкорпиловцы-82, Шкорпиловцы-83, Шкорпиловцы-85; Inman, 1957; Miller, Komar, 1980; Nielsen, 1984; Tanner, 1971)

определяться факторами, не включенными в состав выбранных параметров. Тогда в координатах  $D$ ,  $\psi$  (рис. 2) границы области, за пределами которой активные рифели не должны существовать, могут быть определены следующими условиями:

$$\psi < \exp(1,0 + 1,8 \cdot 10^{-3} D^{0,78}) \quad (4)$$

– рифели не возникают,

$$\psi > \exp(5,5 - 120 D^{-0,7}) \quad (5)$$

– рифели стерты.

Область, внутри которой дно всегда должно иметь рифельную форму, определяется следующими ограничениями:

$$\psi > \exp(1,8 + 10^{-2} D^{0,61}) - 4,6, \quad (4')$$

$$\psi < \exp(5,3 - 217 D^{-0,77}). \quad (5')$$

Как видно из графика, полученные другими авторами ограничения могут рассматриваться как частные случаи найденных решений. Так, нижняя огибающая в диапазоне малых  $D$  практически совпадает с ограничением Бребнера, при  $10^3 < D < 5 \cdot 10^3$  близка к зависимости Косьяна и достигает ограничений Косьяна и Кочергина, а также Динглера вблизи точки пересечения с кривой (5).

Подобные переходные области легко выделить и в координатах  $D$ ,  $\theta$ . Их границы (рис. 3) можно аппроксимировать следующими выражениями:

$$\theta = \exp(1,3 \cdot 10^{-4} D - 3,25), \quad (6)$$

$$\theta = \exp(-275 D^{-0,90}) \quad (7)$$

– вне этих пределов активные формы не возникают,

$$\theta = \exp(1,2 \cdot 10^{-4} D^{0,79} - 3,05), \quad (6')$$

$$\theta = \exp(-500 D^{-1,0} - 0,18) \quad (7')$$

– внутри этого поля дно покрыто рифелями.

К этому случаю применимы те же рассуждения, что и к предыдущему. Так, выражения (6) и (7) приближаются к ограничениям Нильсена  $\theta = 0,04$  и  $\theta = 1,0$ , а в определенных диапазонах практически совпадают с эллипсом Косьяна.

### Параметры активных рифелей

Известно, что с ростом придонных скоростей изменяются высота ( $\eta$ ) и длина ( $\lambda$ ) активных рифелей вплоть до их стирания, а стабильными размеры микроформ бывают лишь после определенного времени воздействия стационарного волнения. Причем при затухании скорости процесс переработки рифельного рельефа идет значительно медленнее, чем при ее росте, а при резком уменьшении скорости формы могут консервироваться и последующая роль более слабого волнения сведется лишь к выполаживанию резких очертаний рифелей.

Если в русловой литературе приводится множество результатов как по активным, так и по пассивным рифелям, то исследователям океана не часто удается наблюдать активные микроформы, что связано с трудностями "проникновения" в шторм. Но и решившему эту задачу наблюдателю требуется определить, соответствуют ли регистрируемые формы действующему режиму, унаследованы ли от предшествующего или находятся в стадии перестройки.

В большинстве известных случаев измерения параметров рифелей выполнялись водолазами, а не специалистами по динамике наносов, поэтому их результаты также нельзя принимать за вполне достоверные. По-видимому, такая ситуация и привела к тому, что, сделав наиболее полное обобщение результатов западных исследователей, Нильсен [16, 26, 27] предложил комплект существенно различных зависимостей для определения параметров рифелей (рис. 4):

$$\frac{\eta}{a} = \begin{cases} 0,275 - 0,022\psi^{0,5} & \text{для } \psi < 156 \\ 0 & \text{для } \psi > 156, \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{\lambda}{a} = 2,2 - 0,345\psi^{0,34} \text{ для } 2 < \psi < 230 \quad (9)$$

– для лабораторных экспериментов и

$$\frac{\eta}{a} = 21\psi^{-1,85} \text{ для } \psi > 10, \quad (10)$$

$$\frac{\lambda}{a} = \exp\left(\frac{693 - 0,37\ln^8 \psi}{1000 - 0,75\ln^7 \psi}\right) \quad (11)$$

– для натуральных условий, где аргументами по-прежнему служат параметры "значительных" волн.

Аппроксимации Нильсена обычно признаются наиболее надежными. Эту точку зрения разделили Косьян и Пыхов [22], анализируя результаты натурных наблюдений Косьяна, которые среди прочих следует признать наиболее достоверными уже потому, что подводные обследования дна при весьма активном волновом воздействии выполнены им самостоятельно со специальным тестом соответствия параметров рифелей действующему волновому режиму.

Однако такая точка зрения не представляется вполне обоснованной, а результаты анализа – достаточно надежными. Действительно, если условия натурального эксперимента таковы, что роль изучаемого фактора, в данном случае волнения, является основной, то действие второстепенных факторов должно приводить к определенным расхождениям, но не к принципиальному изменению характера "натурной" зависимости по сравнению с "лабораторной". К такому заключению приводит и более пристальный анализ данных Косьяна, чем тот, что выполнен в работе [22]. Действительно, можно построить следующие связи, которые ближе к найденным по результатам лабораторных экспериментов и более надежно аппроксимируют эти данные, чем (10) и (11) (рис. 4):

$$\frac{\eta}{a} = 0,36 \exp(-2,2 \cdot 10^{-2}\psi), \quad (12)$$

$$\frac{\lambda}{a} = 2 \exp(-7 \cdot 10^{-3}\ln^{3,8}\psi). \quad (13)$$

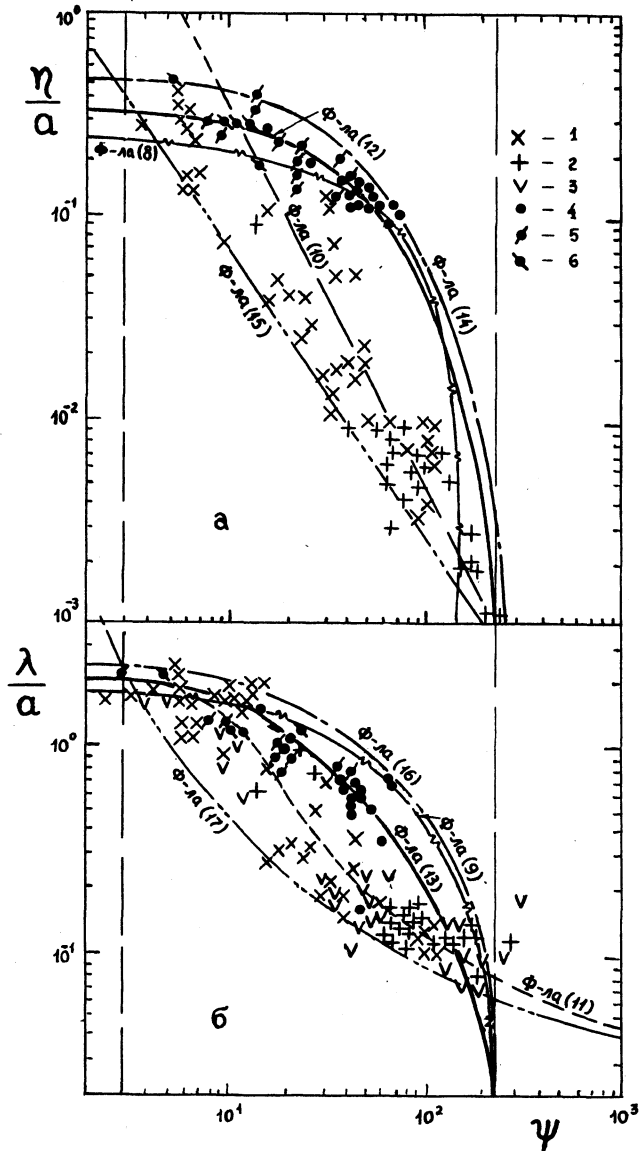


Рис. 4. Сопоставление зависимостей для расчета высоты (а) и длины (б) активных рифелей с данными натуральных наблюдений

Данные наблюдений Р.Д. Косьяна в международных экспериментах: 1 – Камчия-78; 2 – Шкорпиловцы-82; 3 – Шкорпиловцы-83 (приведены в [7]). Данные других исследователей: 4 – Inman; 5 – Dingler; 6 – Miller, Komar (приведены в [28])

Значительный разброс данных объясняется несколькими причинами. Во-первых, влиянием не введенных в рассмотрение факторов, среди которых можно выделить течение, особенно заметное вблизи зоны разрушения волн, различие в разнородности состава донных отложений на разных участках и т.д. Во-вторых, сказываются ошибки экспериментов, среди которых особенно весомым может быть то, что измеренные параметры рифелей могут быть поставлены в соответствии не тому волновому режиму, который их сформулировал. Заметными могут быть погрешности, связанные с измерением под водой в условиях волнения. Разделить роли этих факторов довольно сложно, но по

границам поля точек можно оценить диапазоны возможных изменений параметров рифелей в реальных условиях береговой зоны. Контуры этих полей могут быть определены следующим образом (рис. 4):

$$\frac{\eta}{a} = 0,42 \exp(-0,022\psi), \quad (14)$$

$$\frac{\eta}{a} = 2,1\psi^{-1,45}, \quad (15)$$

$$\frac{\lambda}{a} = 3 - 0,54\ln\psi, \quad (16)$$

$$\frac{\lambda}{a} = 3\ln^{-3}\psi. \quad (17)$$

Так же, как и на рис. 2 и 3, точки пересечения совпадают с ограничениями Бребнера ( $\psi > 3$ ) и Динглера ( $\psi < 240$ ).

### **Размеры пассивных форм, возможность динамических реконструкций**

Наиболее полная подборка данных натурных наблюдений пассивных рифелей содержится в упоминавшейся уже работе Р.Д. Косьяна [23], получившего, казалось бы, парадоксальный результат: параметры пассивных рифелей зависят лишь от размера слагающих их песчаных частиц (рис. 5). Устранив принятое автором различие в размерностях величин, стоящих в правой и левой частях выражений, формулы Косьяна для определения высоты и длины этих форм можно записать следующим образом:

$$\eta' = 287d^{1,22}, \quad (18)$$

$$\lambda' = 1000d^{1,08}, \quad (19)$$

$$[d, \eta', \lambda'] = \text{см.}$$

При этом коэффициенты корреляции оказываются довольно высокими (0,93 и 0,94). Связь объясняется следующим образом: при затухании волнения наступает момент, когда сдвиговое напряжение у дна становится недостаточным для такого интенсивного перемещения частиц, которое способно привести к существенному изменению формы. Этот момент определяется весом или (при  $\rho_p = \text{const}$ ) размером частиц. Основываясь на этих результатах, Косьян делает важный вывод о неправомерности реконструкций волнового режима по унаследованным параметрам рифелей [23].

Предложенная интерпретация принципиально правильна, но вывод не вполне очевиден. Представляется, что следствием приведенного рассуждения должна быть аппроксимация не средних линий, а верхней огибающей поля точек. Она может быть следующей (рис. 5):

$$\eta' = 150d^{0,85}, \quad (20)$$

$$\lambda' = 5 + 1180d \quad (21)$$

$$[d, \lambda', \eta'] = \text{см.}$$

Это означает, что крупные рифели, сформированные развитым волнением, по мере затухания последнего могут трансформироваться до значений  $\eta'$ ,  $\lambda'$ , определяемых выражениями (20), (21). Активные микроформы, размеры которых меньше тех, что находятся по этим формулам, консервируются сразу же с началом затухания волнения. При этом еще некоторое время срабатывает гребень рифеля, и изменение  $\eta'$  будет определяться особенностями стадии затухания волнения или характеристиками последующего более слабого режима. Таким образом, основной информативный показатель этих форм – их длина. Высота и крутизна пассивных рифелей не являются надежными характеристиками.

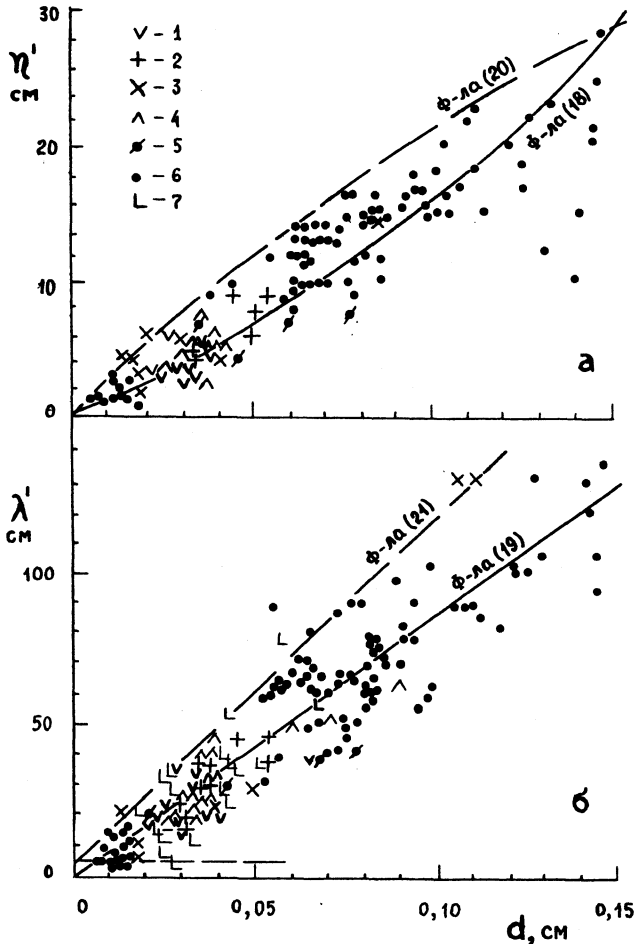


Рис. 5. Сопоставление зависимостей для определения высоты (а) и длины (б) пассивных рифелей с данными натурных наблюдений  
Данные наблюдений Р.Д. Косьяна на полигонах: 1 – Камчия-78; 2 – Шкорпиловцы-82; 3 – Шкорпиловцы-83; 4 – Шкорпиловцы-85; 5 – озеро Иссык-Куль; 6 – залив Сирт [7]; 7 – Tanner [32]

Отмеченная на рис. 5 и в (21) граница  $\lambda' = 5$  см примерно соответствует начальным размерам рифелей, зарождающихся при периодах поверхностных волн, больших, чем 1 с.

Изложенная позиция оставляет принципиальную возможность для динамических реконструкций: для этой цели можно привлекать данные по длинам законсервированных рифелей, значения которых меньше, чем устанавливаемые по (21), так как их сохранившийся размер соответствует стадии развитого волнения.

### Закключение

Представляется, что итоги проведенного анализа более надежны, чем выводы предшествующих исследований.

Что касается активных форм, то это прежде всего потому, что приведенные здесь результаты соответствуют очевидному положению – связи, полученные по данным лабораторных и натурных наблюдений, не должны существенно различаться, а погрешности натурных наблюдений значительнее. Кроме того, эти результаты основываются на большем количестве данных.

Вопрос о возможности прогноза размеров форм обсужден лишь для рифелей с большими параллельными фронтами. И то, что эти возможности оказываются довольно ограниченными, свидетельствует, что и ошибки в определении шероховатости дна могут быть значительными. Следовательно, при рифельной форме дна нельзя ожидать и большой точности прогноза транспорта взвешенных наносов.

Результаты, касающиеся области существования микроформ, относятся, по-видимому, ко всем типам вихревых рифелей, возникающих под действием неразрушенных волн, т.е. к двумерным и трехмерным рифелям, а также к рифелям типа "кирпичная кладка", по классификации Слеса [28].

Этим, однако, не исчерпывается набор микроформ береговой зоны. Р.Д. Косьяну [19] удалось проследить, как с приближением (со стороны моря) к зоне разрушения волн рифельное дно выполаживается, а на самом участке разрушения формируются специфические образования, у которых длинные плоские вершины чередуются с короткими ложбинами – траншеями. После прохождения зоны разрушения картина меняется симметрично: гладкое дно переходит в дно, покрытое трехмерными рифелями, бережье которых уже следуют ровные двухмерные формы. Следовательно, должны быть поставлены задачи создания более полной классификации форм и определения условий их существования.

Предложенную интерпретацию формирования размеров пассивных рифелей вряд ли можно считать окончательной. Возможно, что если ввести в качестве параметра интенсивности затухания волнения, то поле точек на рис. 5б можно будет аппроксимировать семейством прямых. Вместе с тем, поскольку прямая задача – определение шага активных рифелей – решается не вполне надежно, к итогам динамических реконструкций (обратная задача) следует относиться весьма настороженно.

Для более надежного решения перечисленных задач потребуются сбор значительного массива данных корректных наблюдений. При этом наибольшие технические трудности вызовет задача проникновения в зону разрушения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещенко Л.А., Шипилова Л.М. Низкочастотные волновые движения и их связь с рельефом мелководий // Геоморфология. 1994. № 3. С. 62–69.
2. Живаго А.В. Геоморфология и тектоника крупных разломов южной части Аравийско-Индийского хребта // Трансформные разломы Индийского океана. М.: Наука, 1986. С. 53–79.
3. Знаменская Н.С. Гидравлическое моделирование русловых процессов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 240 с.
4. Косьян Р.Д. Некоторые закономерности распределения донных песчаных микроформ в береговой зоне моря // Литология и полезные ископаемые. 1988. № 1. С. 21–28.
5. Анцыферов С.М. О механизме образования песчаных волн // Метеорология и гидрология. 1969. № 3. С. 69–76.
6. Шуляк Б.А. Физика волн на поверхности сыпучей среды и жидкости. М.: Наука, 1971. 399 с.
7. Gyr A., Schmid A. The different ripple formation mechanism // J. Hydr. Res. 1989. V. 27. N 1. P. 61–74.
8. Chabert J., Chavin J.L. Formation des dunes et des rides dans les modes fluviaux // Bul. Centr. Rech. Essais Chatou. 1963. N 4. P. 41–67.
9. Анцыферов С.М., Дебольский В.К. Об устойчивости профиля плоского дна // Тр. Союзморинипроекта № 26(32). М.: 1969. С. 37–41.
10. Kennedy J.F., Falcon M. Wave generated sediment ripples // MIT Hydrodyn. Lab. Rep. 1965. N 86. 55 p.
11. Carstens M.R., Nielson F.M., Altinbilek H.D. Bed form generated in the laboratory under an oscillatory flow: analytical and experimental study // U.S. Army Corp. Techn. Mem. 1969. N 28. P. 1–39.
12. Kos'yan R.D., Kochergin A.D. About the conditions for the wave ripple existence // Proc. of "Euromech 262". Wallingford, 1990.
13. Brebner A. Sand form length under oscillatory motion // Proc. 17th Coast. Eng. Conf. 1980. Sydney. V. 2. P. 1340–1343.
14. Dinger G.R. Wave formed ripples in nearshore sands // Ph. Thesis Univ. of California. San Diego, 1974. 136 p.
15. Komar P.D., Miller M.C. The initiation of oscillatory ripple marks and the development of plane bed at high shear stress under waves // J. Sediment. Petrol. 1975. V. 45. N 3. P. 697–703.
16. Nielsen P. Dynamics of geometry of wave-generated ripples // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. N 7. P. 6467–6472.

17. Horikawa K. Nearshore dynamics and coastal processes. Tokio, 1988. 515 p.
18. Vongvisessomjai S. Oscillatory ripple geometry // J. Hydraul. Eng. 1984. V. 110. P. 247–266.
19. Косьян Р.Д. Об образовании и существовании рифелей при волнении в береговой зоне водоемов // Вод. ресурсы. 1987. № 1. С. 52–60.
20. Kos'yan R.D. Review of recent coastal research in the Soviet Union // Coastal Zone'91 V. 4. N.Y., 1991. P. 3451–3462.
21. Johnsson I.J. A new approach to oscillatory rough turbulent boundary layer // Ocean Eng. 1980. V. 7. P. 109–152.
22. Косьян Р.Д., Пыхов Н.В. Гидрогенные перемещения осадков в береговой зоне моря. М.: Наука, 1991. 280 с.
23. Kos'yan R.D. On the dimension of passive ripple marks in the nearshore zone // Mar. Geol. 1988. V. 80. P. 149–153.
24. Kos'yan R.D. Study of sand microform in nearshore zone // Mar. Geol. 1988. V. 83. P. 63–78.
25. Kos'yan R.D. The prognosis of a longitudinal sediment transport not far from the Island of Santa Maria // Proc. 2 Congr. Mar. Sci. Habana, 1990.
26. Nielsen P. Some basic concepts of wave sediment transport // Inst. Hydrodyn. and Hydraul // Eng. Tech. Univ. Denmark. Lyndby., 1979. N 2. 160 p.
27. Nielsen P. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Singapore, Nes Jersey, London, Hong-Kong: Scientific World, 1992. 324 p.
28. Sleath J.F.A. Sea bed mechanics. N.-Y.: Willey, 1984. N 4. 355 p.

Институт океанологии РАН

Поступила в редакцию  
10.01.95

## FORECAST OF RIPPLES EXISTENCE CONDITIONS AND PARAMETERS OF WAVE BUILT SANDY RIPPLES

S.M. ANTSEYFEROV, A.S. EFREMOV

### S u m m a r y

The comparison between the means for limiting the area of active ripples existence with observation data shows inability of earlier methods to establish the limits reliably. It is shown that the limits can be determined using functions relating sand particle dimensions or orbital radius of motion near the bed to particle mobility characteristics or the Shields parameter; the functions are more complex than linear or power ones. The relationships between active ripple dimensions and orbital radius and mobility characteristic as developed by the authors are more reliable than previously known methods. Equations are suggested for calculation of passive ripples maximum dimensions, and a possibility of dynamic reconstruction based on the data on the forms is established.

УДК 551.435.16(470.311)

© 1996 г. С.И. БОЛЫСОВ, Н.В. ТАРЗАЕВА

## МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР В РАЗВИТИИ РЕГРЕССИВНОЙ ЭРОЗИИ НА ЮГО-ЗАПАДЕ ПОДМОСКОВЬЯ

К настоящему времени накоплен значительный материал по вопросам формирования и динамики малых эрозионных форм (МЭФ). Между тем данные о временной изменчивости МЭФ в зависимости от хода метеорологических показателей единичны.

Особенности строения и истории развития малых эрозионных форм, их современной динамики и факторы, влияющие на нее, для центральной части краевой зоны московского оледенения были наиболее подробно рассмотрены в работе С.И. Болысова [1] на примере бассейна реки Протвы. В.Н. Голосов [2] предпринял попытку объяснения временной изменчивости некоторых МЭФ для той же территории в зависимости от метеорологических условий. Большое значение уделялось влиянию ливневой эрозии на развитие МЭФ. Для