

Г. Н. Аксентьев,
канд. геогр. наук, доцент

ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПАСОВ ЭНЕРГИИ ПРИБОЙНОГО ПОТОКА НА ИЗВИЛИСТОМ БЕРЕГУ ПРИ ОТМЕЛОМ ПОДВОДНОМ СКЛОНЕ

В 2007 г. исполняется 100 лет со дня рождения доцента кафедры физической географии Одесского государственного университета им. И. И. Мечникова, кандидата географических наук Г. Н. Аксентьева. Он был одним из тех ученых, которые впервые в университете стали изучать береговую зону моря и преподавать береговедение. В ознаменование этой круглой даты профессором Ю. Д. Шуйским подготовлена к печати статья, написанная Г. Н. Аксентьевым в 1969 г., но не опубликованная до настоящего времени. Статья посвящена описанию оригинального натурального эксперимента, который позволил определить запасы энергии прибойного потока на оползневых Одесских берегах, перед которыми располагается отмельный подводный склон. Примененная методика и результаты, полученные около 40 лет назад, актуальны и в наши дни.

Ключевые слова: Черное море, береговая зона, волна, репер, дно, наносы, прибойный поток, энергия.

Введение. В настоящее время остается недостаточно полно изученной энергия прибойного волнового потока как результат полного разрушения ветровых волн по мере их приближения к берегу. Это приводит к диссипации энергии, при которой колебательные движения частиц воды превращаются в поступательные, т. е. в поток [4, 5]. Максимальный расход энергии образуется там, где волна опрокидывается, что обуславливает формирования прибоя. Он является источником энергии, расходуемой на преодоление трения при движении над шероховатой наклонной поверхностью подводного склона. Шероховатость вызвана неровностью поверхности дна и частицами наносов. К тому же волновая энергия затрачивается на перемещение наносов, на преодоление сил трения, на истирание наносов, выталкивание капелек воздуха между частицами осадочной породы и др. Происходит диссипация волновой энергии. Изучение такого механизма весьма *актуально*.

Целью статьи является выявление запасов волновой энергии и донных скоростей опрокидывания волны, подходящей к извилистому оползневому берегу над сложной поверхностью подводного склона. Это необходимо для установления эволюции оползневых склонов и разработки оптимальной берегозащиты. Поэтому статья имеет важное *практическое значение*. Методика выполнения эксперимента и результаты полученных расчетов дают возможность утверждать *теоретическое значение* статьи. До настоящего времени подобные эксперименты не проводились у Одесских берегов Черного моря [3], в связи с чем результаты и выводы статьи *являются новыми*.

Методика эксперимента. По нормали к береговой линии в зафиксированном створе (створными знаками) на прибрежном дне (средний уклон поперечного профиля бенча и морского склона пляжа около 5°), от пляжа до глубин 0,5–1,3 м, вертикально устанавливались металлические штыри (стержни), диаметром 20 мм. Их количество было равным 21. Расстояние между соседними стержнями составляло 1 м. Получается, что они охватывали длину движения волны, равную 20 м, и позволяли измерять достаточно большую длину дистанции затухания ветровой волны.

Каждый стержень имел свой опознавательный знак, который соответствовал его номеру. Таким образом он сразу же фиксировал длину прибойного потока, растекающегося по пляжу, регистрировал путь передвигающихся наносов и скорость самого потока. Геодезическая привязка стержней производилась к базовым линиям теодолитных ходов, проходящих вдоль берега. С помощью этой привязки точно обозначалось место эксперимента, направления береговых линий, уклоны абразионного подводного склона (бенча), направления и скорости движения наносов и ветровой волны. На каждом из изученных участков работы производились в течение до 15–16 инструментальных случаев наблюдений. Полученные данные осреднялись для обобщенной характеристики.

В качестве главного объекта нашего эксперимента выбирались наиболее крупные обломки в составе пляжевых наносов и поднимающиеся движением воды во время опрокидывания волны. Для проверки и подтверждения участия крупных наносов в процессе перемещения, во время конкретного волнения они собирались исследователем, накапливались, а затем их достаточное количество беспорядочно выбрасывалось в полосу обрушения волны. Затем фиксировались движущиеся обломки породы (окатанная и угловатая галька), наиболее активно участвующие в волновом движении волочением или сальтацией.

Они отбирались отдельно от остальных. Затем они окрашивались стойкой краской, чаще всего анилиновой, нумеровались, обмерялись и взвешивались. Маркированная галька укладывалась вокруг каждого стержня. Перемещаясь, эти наносы могли двигаться только определенными размерами волн, в соответствии со своей различной гидравлической крупностью. Но поскольку с приближением к пляжу над подводным склоном и над морским склоном пляжа энергия волны уменьшалась (по закону окончательного обрушения), то галька достигала только лишь определенной позиции. Чем “легче” были частицы наносов, тем дальше они продвигались волнами одинаковых размеров. Увеличение размеров волны приводило к более длинному пути частиц одной и той же гидравлической крупности, и наоборот. Поскольку были известными вес, форма, окатанность частиц наносов, а также пройденный путь под влиянием волновой энергии, то можно было рассчитать и затраты энергии.

Эти операции производились повторно, во время различных волновых ситуаций, при разных высотах волн. С помощью штырей измерялись параметры волнового прибойного потока: высота, длина, период. Эксперимент выполнялся при средних высотах волн от 0,5 до 0,8 м в разных точках

вдоль оползневого берега. При сходных условиях (размеры волн, уклон дна и пляжа, состав наносов, окатанность) разница в весе частиц наносов составляла не более первых процентов. Продолжительность всего эксперимента составила 37 месяцев, в течение которых выбирался подходящий волновой режим.

Результаты исследований и их анализ. В процессе подведения итогов описанного эксперимента наносы были систематизированы по линейным и весовым размерам. Оказалось, что в нашем эксперименте форма и окатанность обломков существенного значения для расхода механической волновой энергии не имели. Ведущую роль играла плотность породы, определяющая вес гальки. По-видимому, здесь проявилась закономерность, согласно которой большая масса наносной частицы затушевывает влияние геометрической формы, а это влияние растёт с уменьшением массы, т. е. — размера.

Обобщенные результаты эксперимента представлены в табл. 1. Эти данные были вынесены на график (рис. 1). Как можно видеть, по горизонтальной оси отложены значения средних высот волн (h , м), а по вертикальной оси — значения веса перемещаемой гальки (F , г). Очевидно, что полученная кривая и ее форма представляют собой $F = f(E)$, т. е. функцию энергии ветровой волны с уравнением: $F = K \cdot h^2$, где K — коэффициент условий.

Таблица 1

Зависимости веса поднимаемых волной наносов от высоты разрушающейся волны во время эксперимента

Число опы- тов	Число случаев	Высота волны, м	Вес наносов, движимых волной, г	Число опы- тов	Число случаев	Высота волны, м	Вес наносов, движимых волной, г
2	30	0,05	5	2	28	0,50	260–263
3	42	1,10	30	3	43	0,60	380–382
5	75	0,20	57-58	2	30	0,70	570–573
2	28	0,30	112,4–112,8	1	13	0,80	968
3	44	0,40	167,8–169,5	1	14	0,80	999

Вспомним уравнение механической энергии ветровой волны, отнесенную к 1 м длины берега [1, 5], которая равна: $E = 0,125 \cdot h^2 \cdot \rho \cdot g$, притом, что ρ — плотность морской воды (близка 1), g — ускорение свободного падения. Как можно видеть, обе формулы являются однотипными, идентичными, лишь во второй формуле роль коэффициента K играет выражение “ $0,125 \cdot \rho \cdot g$ ”. Это обстоятельство дает возможность полагать, что вес угловатых и окатанных обломков наносов, поднимаемых морской волной, пропорционален энергии этой волны (в основном, квадрату ее высоты) до момента окончательного обрушения на поверхности пляжа.

Для решения указанной зависимости нами была построена в одинаковом масштабе кривая, описываемая уравнением $E = 0,125 \cdot h^2 \cdot \rho \cdot g$. При этом плотность воды принимается равной единице, вследствие сильного притока пресных вод из Днепра и Южного Буга (влияние длительных восточных и северо-восточных ветров) во время эксперимента. Наложение этой кри-

вой на представленную на рис. 1 показало, что они в общем совпадают и отражают идентичные закономерности. Из этого следует, что коэффициент $K = 0,125 \cdot \rho \cdot g$.

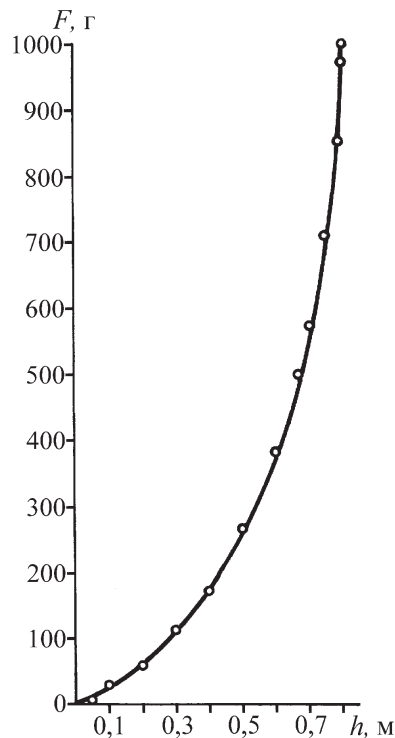


Рис. 1. График зависимости веса F движущихся наносов от энергии ветровых волн, выраженной через h — среднюю высоту волны

Это означает, что трогание и сальтация окатанной и неокатанной пляжевой гальки указывают на соответствующие затраты энергии по мере приближения фронта волны к берегу. Значения энергии обусловлены известным весом отдельных галек и затрат на трение гальки по глинистому дну, по песку и по известным значениям вязкости воды.

Таким образом, оказалось возможным измерить энергию волн разных размеров и оценить достоверность расчетных формул.

При решении основных задач данной статьи был получен еще один важный результат. Попутно определялись донные волновые скорости в пределах различных расстояний от линии забурунивания волны. Наиболее важные данные относятся к первому метру пути волны. Данные, полученные во время нашего эксперимента, оказались очень близкими тем, которые были определены Н. А. Беловым [2] в его опытах по движению гальки в Лименской бухте (табл. 2). Небольшое расхождение может быть отнесенным на счет различных литологических свойств гальки, сложенных иными породами в Лименской бухте. Небольшие расхождения могли быть вызваны более крутым уклоном подводного склона, большей шероховатостью пляжа и приурезовой части подводного склона, более высокими значениями удельного расходования волновой энергии. При этом следует указать, что Н. А. Беловым вес определялся по справочнику, а в экспери-

менте он был фактическим по собственным измерениям, что делает наши результаты более достоверными.

Таблица 2

Размеры движущихся наносов и величины донных скоростей прибойного потока при натурных экспериментах

Данные Н. А. Белова			Данные Г. Н. Аксентьева		
диа- метр, см	вес, г	скорость прибойно- го потока, м/с	размеры обломочных частиц, см	вес, г	скорость прибойно- го потока, м/с
1–2	1,3–10,5	0,8 — 1,0	1х1х1 — 1х1х2	2,5–5,0	0,7 — 0,9
2–6	10,5–282,0	1,0 — 1,6	2х4х3 — 4х4х5	60–200	1,2 — 1,6
6–10	282,0–1039,0	1,6 — 3,0	4х4х6 — 6х8х10	240–1100	1,7 — 3,2

Выводы. Изложенные материалы и их анализ привели к таким основным выводам данной работы.

1. Значения затрат механической энергии волн обусловлены известным весом отдельных галек и затрат на трение гальки по глинистому дну, по песку и по известным значениям вязкости воды. Таким образом, оказалось возможным измерить энергию волн разных размеров и оценить достоверность расчетных формул. Чем больше энергия, тем крупнее гальки приходят в движение. Неравномерная потеря энергии волны вдоль ее фронта приводят к рефракции.

2. Для перемещения гальки объемом около 1–2 см³ и весом примерно 5 г требуется, чтобы скорости прибойного потока были бы равными 0,8 м/с. Гальки размером до 300–400 см и весом примерно 1000 г в состоянии перемещаться под влиянием волновых течений со скоростями ≈ 3 м/с. Поскольку поле прибрежных волновых скоростей является сложным неравномерным, то разница скоростей разрушающейся волны объясняет неравномерность сортировки наносов по гидравлической крупности.

Литература

1. Башкиров Г. С. Динамика прибрежной зоны моря. — Москва: Морской транспорт, 1961. — 220 с.
2. Белов Н. А. О движении гальки в Лименской бухте // Ученые записки Московск. гос. университета. — 1938. — № 19. — С. 105–119.
3. Зенкович В. П. Основы учения о развитии морских берегов. — Москва: Изд-во АН СССР, 1962. — 710 с.
4. Зубов Н. Н. Динамическая океанология. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1947. — 385 с.
5. Лонгинов В. В. Динамика береговой зоны бесприливных морей. — Москва: Изд-во АН СССР, 1963. — 379 с.

Г. М. Аксентьев

**ДОСВІД ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ЕНЕРГІЇ ХВИЛЬОВОГО
НАКАТУ НА ЗВИВИСТОМУ БЕРЕЗІ ІЗ МІЛИННИМ ПІДВОДНИМ
СХИЛОМ**

Резюме

В 2007 р. виповнюється 100 років від дня народження доцента кафедри фізичної географії Одеського державного університету ім. І. І. Мечникова, кандидата географічних наук Георгія Миколайовича Аксентьева. Він був одним з тих вчених, які вперше в університеті почали вивчати берегову зону моря та викладати берегознавство. З приводу цієї круглої дати, професором Ю. Д. Шуйським підготовлена до друку стаття, що була написаною Г. М. Аксентьевим ще в 1969 р., але до цього часу не була оприлюднена. Стаття присвячена описам оригінального натурного експерименту, що дозволив визначити енергетичні характеристики вітрових хвиль уздовж зсувних Одеських берегів, перед яким розташований мілинний підводний схил. Застосована методика і результати, отримані майже 40 років тому, є актуальними і сьогодні.

Ключові слова: Чорне море, берегова зона, хвиля, репер, дно, наноси, накат, енергія

G. N. Aksentiev

**EXPERIENCE OF CALCULATION OF WAVE'S SURF ENERGY
VALUES ALONG TWISTING LANDSLIDING SHORELINE WITH
SHALLOW SUBMARINE SLOPE**

Summary

In 2007, 100 years have passed from birthday of Dr. George Aksentiev (1907-1972), who was Assoc. Professor of Physical Geography Department of State Mechanikov's University of Odessa. He was first of the University scientists who began to research the coastal zone according to geographical theory of coastal science and began to teach the coastal science for students-geographers of the University. According to the memorial event, Prof. Yuriy Shuisky prepared for publication Aksentiev's manuscript on calculation of wave surf energy during refraction process, that wasn't published from 1969. This wave experiment was held along the Black Sea landslide shores with shallow nearshore bottom. Applied methods and materials received ≈ 40 years ago are actual to-day also.

Key words: Black Sea, coastal zone, wave, mark, bottom, sediment, surf, energy