

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.4.025(47:282.4)

Н. Н. ВИНОГРАДОВА, А. А. САМОЙЛОВА

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ
ВОДОХРАНИЛИЩ НА МОДЕЛИ

Экспериментальное моделирование в лаборатории дает возможность получить представление о развитии и особенностях процесса переформирования берегов в целом и отдельных его этапов от начальной фазы до стадии относительной стабильности. Лабораторное изучение процесса формирования береговой зоны проводилось многими исследователями и в основном было посвящено установлению зависимости скорости и расхода вдольберегового потока наносов от параметров волнения и угла подхода волн к берегу, а также морфологических особенностей береговой зоны (Пышкин, 1966; Аверин и др., 1966; Максимчук, Аверин, 1964; Филиппова, 1959; Орлова, 1961, 1965; Saville, Thorndike, 1950; Johnson, 1952; Inman, Bagnold, 1963; Larras, 1966; Bonnefille, Pernecker, 1967; Sunamiga, Tsuguo, 1973, и др.).

Цель опытов, проведенных в лаборатории экспериментальной геоморфологии МГУ, заключалась в том, чтобы установить предельный уклон береговой отмели при заданном режиме волнения, скорость смещения линии берега, соотношение объемов размыва и аккумуляции наносов, а также зависимость мощности активного слоя наносов от глубины воздействия волн на дно и влияние величины угла подхода луча волны к линии берега на интенсивность перечисленных процессов. В отличие от упомянутых выше исследований в проведенных опытах основное внимание было уделено изучению особенностей перестройки берегового склона и определению объемов размыва и аккумуляции наносов в пределах береговой зоны.

Как известно, основными факторами переформирования берегов являются волнение, течения, колебания уровня воды, а также геолого-геоморфологическое строение берегов. В проведенных лабораторных экспериментах изучались процессы развития берегов только под воздействием волнения. Уровень водоема был постоянным, состав пород, слагающих береговой склон, однородным.

Модель берега помещалась в волновом лотке длиной 10 м, шириной 2 м с высотой бортов 1 м. Особенности модели берега заключались в следующем: 1) первичный склон имел прямую береговую линию и равномерный уклон; 2) угол подхода луча волны к линии берега достигался изменением положения берегового склона относительно направления волнения; 3) в береговой зоне происходило перераспределение только того материала, которым данный склон был сложен; дополнительной

подачи наносов на модель не производилось; 4) склон был сложен песком со средневзвешенным диаметром частиц $0,26 \text{ мм}$ и коэффициентом сортировки $1,7$.

Воспроизводились последовательно два режима волнения: в первом режиме высота волны составляла $2,2\text{--}2,5$, длина $18\text{--}20 \text{ см}$; во втором соответственно $8\text{--}10$ и $80\text{--}100 \text{ см}$. Задавались следующие углы подхода луча волны к линии берега: $90, 60, 45$ и 30° .

Для сравнения процесса переформирования берегов в лабораторных и натуральных условиях были привлечены полевые наблюдения авторов на

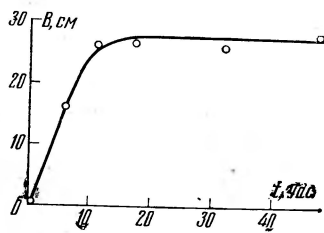


Рис. 1. Зависимость ширины (В) волноприбойной площадки от времени воздействия волнения (t)

Можайском водохранилище, а также литературные материалы по другим водохранилищам. На Можайском водохранилище при наиболее часто повторяющихся скоростях ветра 5 м/сек максимальные высоты волн 1% -ной обеспеченности изменяются от 7 до 21 см . Эти высоты волн довольно близки к тем, которые были во втором режиме волнения ($h_b = 8\text{--}10 \text{ см}$), создаваемом в лаборатории.

Первоначальный этап лабораторных экспериментальных исследований заключался в установлении исходного уклона берегового откоса. Для этого песчаному склону модели задавался угол естественного

откоса песка (30°). На такой откос воздействовали волны первого режима ($h_b = 2,2\text{--}2,5 \text{ см}$), направленные по нормали к линии берега. Развитие профиля берегового склона происходило по абразионному типу. По всей длине берега формировался клиф значительной крутизны ($60\text{--}80^\circ$), который под действием волн постепенно смещался в сторону суши; по мере отступления у подножия образовывалась волноприбойная площадка (бенч), полого наклоненная в сторону водоема. В первые часы работы волн ширина этой площадки быстро увеличивалась. Так, за первые 6 час ее ширина достигла $15\text{--}20 \text{ см}$, а за последующие 6 час увеличилась всего на 5 см . В дальнейшем при неизменном режиме волнения размеры волноприбойной площадки практически не изменялись и ее ширина в среднем не превышала 25 см (рис. 1). Угол наклона площадки составил 8° ($\text{tg } \alpha = 0,14$). Эта величина в продолжение опыта не изменялась. Полученный уклон береговой отмели в последующих экспериментах был принят за исходную крутизну модели склона. Дальнейшее развитие берегового склона с заданным первичным уклоном ($0,14$) зависело от изменения волновых условий (параметров волн и угла подхода луча волны к линии берега). В опытах Б. А. Пышкина (1966) по определению динамического равновесия откоса при фронтальном подходе волн значения полученных уклонов были близки к установленному в описываемых опытах.

Сравнивая данные, полученные экспериментально, с материалами наблюдений на водохранилищах, необходимо отметить, что уклон прибрежной отмели, выработанный в первые годы существования водохранилища, как правило, в дальнейшем остается в общем постоянным. Так, на Горьковском водохранилище при почти неизменном уровне воды в навигационный период уклон отмели на берегах, сложенных флювиогляциальными песками, за период с 1957 по 1960 г. оставался постоянным и составлял на различных участках от 2 до $4,5^\circ$ (Ярославцев, 1961).

Известно, что в первые годы существования водохранилища процесс переформирования его берегов идет наиболее интенсивно; по мере формирования прибрежной отмели, которая служит как бы амортизатором волнения, размыв берегов затухает. По данным Н. А. Ярославцева (1961), на Горьковском водохранилище в первый год его заполнения

(1957) отступление берега составило у с. Андроново 25 м, у г. Юрьеvec — 6 м, а в 1960 г. соответственно 1,4 и 1,0 м. На водохранилищах канала им. Москвы в первые годы скорость размыва берегов была до 1,2 м за сезон, а через 8—10 лет снизилась до 0,4 м (Качугин, 1951).

Лабораторные исследования перемещения наносов волнением И. Я. Филипповой (1959) и Г. А. Орловой (1965) показали, что в начальный период волнового воздействия на откос (первые 500—1000 волн) его деформация происходит наиболее интенсивно. Величина размыва в этот период составляет 50% от всей величины размыва в конце опыта.

Таблица 1

Скорости смещения линии берега

Угол подхода луча волны к линии берега, град.	Первый режим волнения		Второй режим волнения	
	время воздействия волн, час	скорость смещения, см/час	время воздействия волн, час	скорость смещения, см/час
90	6	3,5	1	19,0
	13	0,8	3	1,1
60	6	2,9	2,5	15,6
	20	0,4		
45	6	0,7	2,5	5,4
	20	0,3		
30	13	0,3	1	9,1
			2	0

В наших опытах отступление линии берега наиболее интенсивно происходит также в первые часы работы волн. При этом обнаружена определенная зависимость скорости отступления береговой линии от режима волнения и угла подхода луча волны к линии берега. В табл. 1 приведены экспериментальные данные о скоростях смещения береговой линии откоса крутизной 0,14 при различных параметрах волнения и углах подхода луча волны.

Как видно из табл. 1, наибольшие скорости смещения береговой линии в первые часы работы волн отмечаются при подходе волн по нормали к берегу. При уменьшении значения этого угла скорость смещения замедляется. Это вполне объясняется тем, что максимальная концентрация энергии волн связана с подходом волн по нормали к берегу.

Кроме того, при изучении процесса смещения береговой линии были выявлены следующие закономерности. При подходе луча волны по нормали к однородному в литологическом отношении береговому склону по всей его длине происходит отступление береговой линии параллельно ее первоначальному положению. Однако характер смещения береговой линии меняется, если угол подхода луча волны отклоняется от нормали; при косом подходе волн (45 и 30°) наблюдается развитие сопряженных зон отступления и нарастания берега и существование нейтральной полосы между ними (рис. 2). В результате процесса перестройки береговой линии отмечается ее стремление к развороту по нормали к лучу волны. Эта тенденция особенно отчетливо наблюдается в опытах, когда угол подхода луча волны к линии берега был близок к 45°. Интересно, что при увеличении этого угла до 60° отступление берега происходило почти параллельно его первоначальному положению.

Волновое воздействие на дно водоема не ограничивается узкой полосой береговой отмели. При определенном соотношении высот волн и глубин водоема оно может захватывать всю прибрежную мелководную зону и подводные возвышенности в глубоководной зоне. Экспериментальные исследования позволили установить размеры зоны воздействия волн на дно, а также ее зависимость от параметров волнения и угла подхода луча волны к берегу. В опытах установлено, что при данном соста-

ве грунта глубина воздействия волновых движений на морфологию дна колеблется от 0,5 до 0,3 длины волны, что вполне согласуется с известными данными В. П. Зенковича (1946). Естественно, что волны второго режима создавали гораздо более широкую зону морфологического воздействия, чем волны первого режима. Соотношение площадей этой зоны при разных режимах волнения и углах подхода луча волны у линии берега изменяется от 1,1 до 3,7. Наибольшая площадь зоны, как и следовало ожидать, отмечается при угле подхода луча волны по нормали к линии берега, так как именно в этих условиях наблюдается макси-

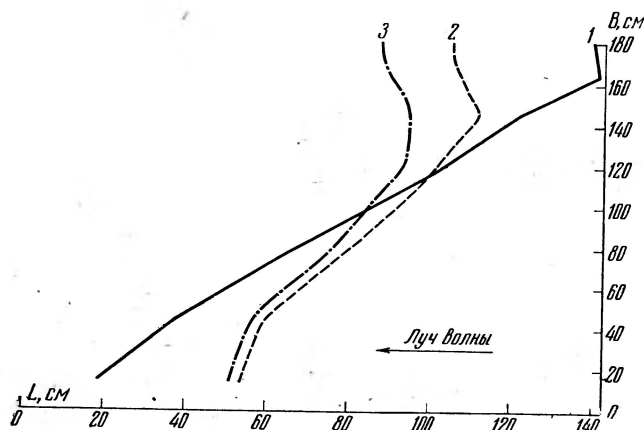


Рис. 2. План изменения линии берега при подходе волн первого режима под углом в 45° :

1 — первичная береговая линия; 2 — после 6 час работы волн; 3 — после 20 час работы волн. В и L — ширина и длина участка берега

мальная энергия волнения. При косом подходе луча волны к линии берега размеры этой зоны значительно убывают.

При определении объема наносов, образовавшихся в процессе формирования берегов, важно учитывать мощность их активного слоя, изучению которого в природных условиях уделяется недостаточное внимание. По данным экспериментов установлено, что максимальная мощность активного слоя наносов в обоих режимах волнения отмечается при углах подхода луча волны в 45° , а минимальная — при прямом подходе. При этом минимальная мощность размыва — аккумуляции при воздействии волн первого режима в 3—4 раза меньше, чем при работе волн второго режима, а максимальная соответственно в 1,5—2,5 раза.

С изменением волнового режима связаны также размеры зон размыва и аккумуляции. Так, при воздействии на склон волн обоих режимов площадь зоны размыва достигала максимума при угле подхода луча волны к линии берега в 30° . Максимальная же площадь зоны аккумуляции в условиях первого режима волнения наблюдалась при прямом подходе волн, а в условиях второго режима — при угле в 60° .

Мощность активного слоя наносов и площади зон размыва и аккумуляции определяют объемы наносов, перемещенных волнением. Естественно, что для изученных режимов волнения получены величины разных порядков. При работе волн первого режима полученные объемы размыва и аккумуляции на два порядка ниже, чем при работе волн второго режима. Отмеченная в опытах значительная разница между объемами размыва и аккумуляции объясняется тем, что волновые движения воды не только размывают и перемещают материал на склоне, но и частично переводят его во взвешенное состояние, что, к сожалению, в

проведенных опытах не учитывалось. Кроме того, известно, что при косоподходящем волнении объем размыва всегда превышает объем аккумуляции, так как часть смытого материала уносится вдольбереговым потоком (Аверин и др., 1966). Указанное соотношение объемов размыва и аккумуляции имело место и в наших опытах. Максимальный объем размыва и аккумуляции наносов при воздействии на склон волн первого режима отмечается при угле подхода луча волны в 30° . Работа волн второго режима приводит к тому, что объем размыва становится наибольшим при подходе волн под углом в 45° , а объем аккумуляции — при прямом подходе. Для сравнения приведем данные по размыву берегов

Таблица 2

Средняя скорость размыва и аккумуляции наносов в береговой зоне

Угол подхода луча волны к линии берега град.	Скорость размыва, $дм^3/час$		Скорость аккумуляции, $дм^3/час$	
	при работе волн первого режима	при работе волн второго режима	при работе волн первого режима	при работе волн второго режима
90	0,05	10,8	0,3	8,3
60	0,3	37,5	0,3	16,0
45	0,7	121,6	0,7	28,3
30	1,5	20,3	0,6	16,5

Можайского водохранилища. Здесь наибольшая повторяемость ветра заданного направления вызывает максимальный размыв на берегах, ориентированных под углом $30-50^\circ$ к направлению ветра. Эти берега составляют более половины всех размываемых берегов водохранилища. Как установлено проведенными ранее лабораторными исследованиями, угол подхода волн к берегу, при котором скорости вдольбереговых течений и расход наносов достигают максимальных значений, изменяется также в пределах $30-45^\circ$ (Филиппова, 1959; Орлова, 1961, 1965; Saville, Thorndike, 1950; Johnson, 1952; Inman, Vagnold, 1963).

Объемы перемещенных наносов позволяют определить скорость процессов размыва и аккумуляции. Оказалось, что средняя их скорость при подходе луча волны по нормали к линии берега меньше, чем при косом угле подхода волн (табл. 2). Причем при косом угле подхода волн скорость размыва как средняя, так и за отдельные интервалы времени больше скорости аккумуляции.

Естественно также, что при работе волн первого режима скорость процессов размыва и аккумуляции значительно меньше, чем при работе волн второго режима.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить размеры и уклон береговой отмели для данного волнового режима при постоянном уровне воды, которые соответствуют данным наблюдений на естественных водоемах, а также проследить влияние на динамику береговых процессов угла подхода луча волны к линии берега.

ЛИТЕРАТУРА

- Аверин В. З., Сидорчук В. Н., Сокольников Ю. Н. Лабораторные исследования зоны формирования вдольбереговых потоков наносов. В сб. «Динамика волновых и циркуляционных потоков». Киев, «Наукова думка», 1966.
- Зенкович В. П. Динамика и морфология морских берегов. М.—Л., «Морской транспорт», 1946.
- Качугин Е. Г. О размерах переработки берегов при подпоре рек. «Гидротехническое строительство», № 12, 1951.
- Максимчук В. Л., Аверин В. З. Влияние угла подхода волн на зарождение вдольбереговых течений и транспорт ими наносов. В сб. «Гидротехника и гидромеханика». Киев, «Наукова думка», 1964.

- Орлова Г. А. Опыты по изучению деформаций размываемых откосов и вдольберегового перемещения песка. «Тр. Океанографической комис. АН СССР», т. 8, 1961.
- Орлова Г. А. Лабораторные исследования перемещения наносов волнением. «Тр. Ин-та океанологии АН СССР», вып. 76, 1965.
- Пышкин Б. А. Влияние уклона берега на транспортирующую способность вдольберегового течения. В сб. «Динамика волновых и циркуляционных потоков». Киев, «Наукова думка», 1966.
- Филиппова И. Я. Исследование процессов переработки песчаного берега при косом подходе волн. «Тр. Океанографической комис. АН СССР», т. 4, 1959.
- Ярославцев Н. А. Течения и перемещения наносов в прибрежной зоне Горьковского водохранилища. «Тр. VII Байкальского научно-координационного совещ. по изучению берегов водохранилищ», т. 1. Иркутск, 1961.
- Bonnefille R., Pernecker L. Etude théorique et expérimental du transport littoral. «Bull. Direct études et rech.», № 3, 1967.
- Inman D. L., Bagnold R. A. Beach and neashore processes. Part II. Littoral processes. «Sea», v. 3. New York — London, Interscience, 1963.
- Johnson I. W. Sand transport by littoral currents. «Proceedings of the fifth hydraulics conference». State University of Iowa, 1952.
- Larras I. Cudes de sable charriés par la houle parallément à la côte. «Ann. pouts et chaussées», № 2, 1966.
- Saville, Thorndike. Model study of sand transport along an infinitely long Straight Beach, v. 31, 1950.
- Sunamura Tsuguo. Coastal cliff erosion due to waves. Field investigations and laboratory experiments. «J. Fac. Eng. Univ. Tokio», № 1, 1973.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
16.IX.1974

STUDIES OF FORMATION OF RESERVOIR SHORE ZONE USING EXPERIMENTAL MODEL

N. N. VINOGRADOVA, A. A. SAMOILOVA

Summary

Some data are given on special features of reservoir coast development obtained by laboratory experiments. The technique allows to study stages of the coast development which are difficult to trace at the natural basins. Some data have been obtained on dimensions of shore platform under a certain wave regime. Volumes and mean rates of erosion and accumulation have been estimated.

УДК 551.4.07(571.56)

В. В. ЗАМОРУЕВ

О РОЛИ ЛЕДНИКОВОЙ АККУМУЛЯЦИИ В ФОРМИРОВАНИИ РЕЛЬЕФА МАЛЫК-СИЕНСКОЙ ВПАДИНЫ (СЕВЕРО- ВОСТОК СССР)

Вопрос об истории четвертичного оледенения Северо-Востока СССР еще не может считаться решенным. Одни исследователи (Васьковский, 1959; Карташов, 1966; Ложкин, 1963, и др.) полагают, что Северо-Восток СССР испытал несколько (до пяти — шести) ледниковых эпох, разделенных межледниковьями, другие считают эти выводы недостаточно обоснованными (Баранова, 1972). Анализ имеющихся данных о развитии климата этого региона позволяет высказать предположение, что