

## Методика научных исследований

УДК 551.4.011:551.435.322

© 2014 г. А.Л. ХОМЧАНОВСКИЙ, Е.А. ФЁДОРОВА, Ан.А. ЛЫГИН, **А.Ш. ХАБИДОВ**

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ<sup>1</sup>

*Ин-т водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул; iwep@iwep.ru*

#### Введение

В последние десятилетия искусственные пляжи получили широкое распространение в берегозащите не только морей, но и крупных внутренних водоемов. Объем отсыпки при создании такого пляжа во многом зависит от формы и длины профиля, находящегося в относительном динамическом равновесии.

Термин “профиль динамического равновесия”, введенный впервые В.П. Зенковичем, подразумевает область подводного берегового склона, в пределах которой все наносы находятся в движении, обусловленном действием волн на дно, однако перемещения наносов не происходит ни вниз, ни вверх по откосу и в среднем материал не покидает участок подводного берегового склона. Таким образом, профиль динамического равновесия представляет собой плавную кривую, где частицы совершают колебания с условно постоянным перемещением вверх и вниз по откосу не получая общего перемещения по дну и такая кривая будет проходить от уреза до глубин, где действие волн становится незаметным. Также необходимо отметить, что профиль оказывается вогнутым (уклон возрастает к берегу), причем более крупным наносам будет соответствовать более крутой склон. Если размер зерен не одинаков, то равновесие подразумевает увеличение их крупности с приближением к берегу [1].

При решении широкого круга задач используются различные методы расчета профиля относительного динамического равновесия. Нами предприняты попытки оценки надежности некоторых используемых сегодня методов расчета, описание которых будет представлено ниже.

Для получения исходной информации выбран один из искусственных пляжей, созданный на Новосибирском водохранилище. Этот пляж был намыт в 1959–1962 гг., его реконструкция проведена через 25 лет и до настоящего времени морфометрические характеристики пляжа существенных изменений не претерпели. Этот пляж сходен по своей морфологии с морским побережьем, так как основным рельефообразующим процессом здесь является ветровое волнение, что дает нам право рассматривать береговую зону искусственных водоемов, как крупномасштабную физическую модель береговой зоны моря.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-05-00615-а и № 11-05-10046-к) и федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы” (проект № 16.515.11.5075).

## Методика исследования и результаты расчетов

Для определения параметров профиля относительного динамического равновесия использованы три подхода: формула Брууна–Дина, методика, приведенная в принятом в Российской инженерной практике своде правил “Проектирование морских берегозащитных сооружений” и программный продукт SBEACH. Результаты расчетов сопоставлены с равновесным профилем названного выше пляжа, сложенного песками с медианной крупностью 0.49 мм.

Для расчета профиля относительного динамического равновесия за рубежом используют формулу Брууна–Дина [3]. Математическое выражение для профиля равновесия впервые было предложено Брууном, а впоследствии уточнено Дином, который предложил следующую формулу:

$$h(x) = Ax^{2/3}, \quad (1)$$

где  $A$  – параметр крутизны профиля, зависящий от медианной крупности материала ( $d_{50}$ ): чем крупнее материал, тем круче профиль. Параметр крутизны определяется по следующим соотношениям [4]:

$$A = 0.41 \cdot d_{50}^{0.94} \text{ при } d_{50} < 0.4 \text{ мм},$$

$$A = 0.23 \cdot d_{50}^{0.32} \text{ при } 0.4 \leq d_{50} < 10 \text{ мм},$$

$$A = 0.23 \cdot d_{50}^{0.28} \text{ при } 10 \leq d_{50} < 40 \text{ мм},$$

$$A = 0.46 \cdot d_{50}^{0.11} \text{ при } 40 \leq d_{50} \text{ мм}. \quad (2)$$

В этих формулах размерность  $A$  –  $m^{1/3}$ ,  $d_{50}$  – мм,  $h$  – глубина водоема в интервале от 0 до  $h_*$ . Здесь  $h_*$  – глубина замыкания, т.е. предельная глубина, до которой происходит перемещение наносов, а, следовательно, и текущие колебания формы профиля. Для морей характерное значение  $h_* \approx 5$ –10 м, для внутренних водоемов  $h_* \approx 2$ –5 м [5]. Такое различие объясняется воздействием волн, которые возникают на искусственных водоемах с меньшим значением длин разгона. Рациональный подход для определения глубины замыкания первым разработал Р.Дж. Халлермейер. Она рассчитывалась следующим образом [3]:

$$h_* = 2.28H_e - 68.5 \left( \frac{H_e^2}{gT_e^2} \right), \quad (3)$$

где  $H_e$  – высота волны 0.14% обеспеченности (12 час/год),  $T_e$  – период волны 0.14% обеспеченности (12 час/год),  $g$  – ускорение свободного падения. В нашем случае глубина замыкания составила 2.2 м.

Для расчета профиля динамического равновесия по методу Брууна–Дина был задан исходный профиль в виде набора пар горизонтальных и вертикальных координат пляжа, а параметры волн рассчитаны по юго-западному румбу с наибольшими разгонами волн и наиболее сильными и часто повторяющимися ветрами.

В качестве второй расчетной методики использовались рекомендации из свода правил “Проектирование морских берегозащитных сооружений” [6]. Согласно этому документу, для определения параметров волн требуемой режимной обеспеченности, рассчитывается скорость ветра наиболее волноопасного направления той же обеспеченности. Поскольку искусственные песчаные пляжи относятся к сооружениям четвертого класса капитальности, использовалась скорость ветра 4% обеспеченности (1 раз в 25 лет). На основе данных по повторяемости ветра за период с 1959 по 1987 гг. на билогарифмической клетчатке вероятности была построена кривая распределения скорости ветра. Параметры регистрировались гидрометеорологической станцией “Обская”, расположенной в непосредственной близости от наблюдаемого участка.

Таким образом, была найдена скорость ветра нужной обеспеченности, которая составила 23 м/с. Параметры волн вне береговой зоны вычислялись по эмпирическим зависимостям, полученным Ю.М. Крыловым с соавторами [7], которые являются аналитической основой соответствующих номограмм, приведенных в СНиП [8]. Для последующих расчетов наиболее важным для нас параметром является высота расчетной волны,

которая в результате вычислений составила 1.22 м (такую же волну мы брали и при расчете профиля по методу Брууна–Дина). На основе полученных данных был построен теоретический профиль относительного динамического равновесия.

Следующим подходом при расчете профиля динамического равновесия был выбран метод математического моделирования при помощи программного комплекса SBEACH, в основе которого лежат работы Р. Дина. В качестве основных исходных данных использовались: таблица координат исходного профиля берега, крупность материала, высота и период расчетной волны и время действия волн на побережье, которое задавалось количеством временных шагов и значением шага по времени в минутах. Результаты моделирования представлены на рис. 1. График, который изображен длинным пунктиром, показывает профиль, получившийся при действии волнения в течение 83 часов, а коротким – 138 дней (что в среднем составляет безлюдный период со стабильным уровнем). Мы оставили те же параметры волн и медианную крупность материала, что и при расчетах при помощи других методов.

Рассчитанные профили сравнивались с истинным профилем. Результат сравнительного анализа представлен на рис. 2, где истинный профиль показан жирной линией. По визуальной оценке рисунков можно сказать, что истинный и рассчитанный по методике Дина профили практически полностью совпадают. Под действием текущих волнений материал все время перемещается по склону к берегу и от берега, но не покидает профиль. Тем не менее, при относительно неизменных в долговременном плане внешних условиях осредненная форма профиля за длительный период остается практически неизменной. Так же с истинным профилем хорошо совпадает график, построенный по методу Брууна–Дина.

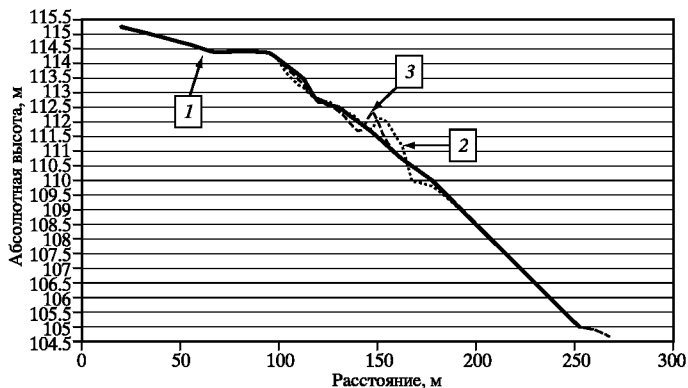


Рис. 1. Результаты моделирования в SBEACH

Профили: 1 – истинный, 2 – при воздействии волнения в течение 138 часов, 3 – то же в течение 83 часов

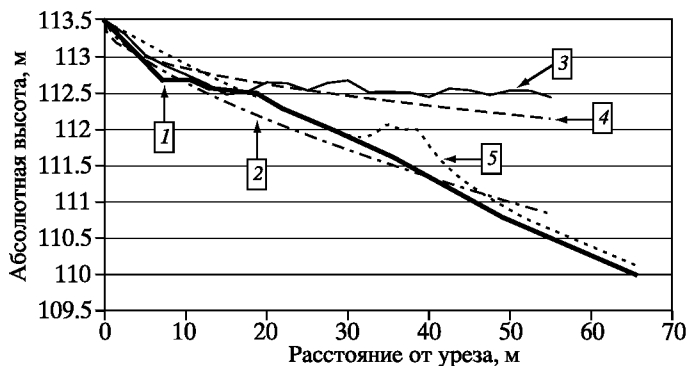


Рис. 2. Сводный график истинного и рассчитанных профилей равновесия

Профили: 1 – истинный, 2 – Брууна–Дина, 3 – по SBEACH (4.7 лет), 4 – по СП 32-103-97, 5 – по SBEACH (138 дней)

роенный в программе SBEACH за период в 138 дней. Однако здесь существует ряд технических нюансов. Результат частично зависит от таких настроек программы как ширина ячейки сетки, количество ячеек, значение шагов по времени, количества этих шагов и других технических настроек самой программы, не имеющих отношения к природным факторам. Но, как правило, изменения рельефа (появление и размыв подводных береговых валов) все же незначительны, и это не отражается на общем уклоне дна, который в свою очередь достаточно неплохо совпадает с истинным профилем пляжа. Что же касается теоретического профиля, построенного по рекомендациям свода правил, принятого в российской инженерной практике, то из рисунка видно, что он находится выше профилей, построенных по другим методикам. Кстати, примерно похожую ситуацию мы видим и на графике SBEACH за период в 4.7 года. Но моделирование данной ситуации практически выходит за рамки реально возможных событий, т. к. этот график показывает те параметры профиля, которые существовали бы при постоянном экстремальном волнении в течение 4.7 лет, что, разумеется, невозможно. Это позволяет нам сделать вывод, что теоретический профиль относительного динамического равновесия, рассчитанный по своду правил, который принят в российской инженерной практике, показывает конечную ситуацию при постоянной экстремальной штормовой нагрузке, что подтверждается моделью SBEACH за долговременный период. Реальный же профиль всегда оказывается ниже. Если пользоваться сводом правил при инженерных решениях, то для отсыпки искусственного песчаного пляжа, вероятно, понадобится значительно большее количество материала, что является экономически не выгодным.

### Заключение

В результате проведенных исследований была подтверждена модель Дина для расчета профиля динамического равновесия, что, безусловно, представляет немалый не только теоретический, но и практический интерес. Также, если вспомнить формулу Брууна–Дина, то становится ясно, что форма профиля зависит в основном от размера частиц, слагающих берег, а не от параметров волн, которые являются ключевыми в других моделях. Полезным может оказаться и то, что модель была проверена на водохранилище, хотя изначально она была создана для морских берегов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
2. *Хабидов А.Ш.* Сравнительный анализ морфологии и динамики береговой зоны внутренних морей и водохранилищ: Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1985. 146 с.
3. *Dean R.G.* Beach nourishment. Theory and practice. New Jersey: World Scientific, 2002. 398 p.
4. *Hanson H., Kraus N.C.* GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. Tech. Report CERC-89-19. Coastal Engineering Research Center. US Army Corps of Engineers. Vicksburg, Mississippi, 1989. P. 1–27.
5. *Леонтьев И.О.* Обзор современных исследований // Леонтьев И.О., Хабидов А.Ш. Моделирование динамики береговой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. С. 61–63.
6. Проектирование морских берегозащитных сооружений. СП 32-103-97. М.: Корпорация Трансстрой, 1998. С. 14–20.
7. *Крылов Ю.М., Стрекалов С.С., Цыплухин В.Ф.* Ветровые волны и их воздействие на сооружения. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 256 с.
8. Строительные нормы и правила (СНиП) 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Госстрой СССР, 1984. 75 с.

Поступила в редакцию 10.05.2012

# COMPARATIVE ANALYSIS OF EQUILIBRIUM BEACH PROFILE CALCULATION METHODS

A.L. KHOMCHANOVSKY, E.A. FEDOROVA, An.A. LYGIN, A.Sh. KHAVIDOV

## Summary

This paper presents the results of evaluation of several methods commonly used in coastal engineering practice for equilibrium beach profile calculation. Three approaches were used to calculate the shape of equilibrium beach profile: the Bruun–Dean formula, the method prescribed by Coastal Structure Construction Code, and numerical modeling by SBEACH. The calculated profiles were compared with the real profile of the equilibrium sand beach. It is shown that the Bruun–Dean formula gives the best agreement with the reality.

УДК 551.4.03:528.067.4(571.14)

© 2014 г. Д.А. ЧУПИНА

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ФОРМ И КОМПЛЕКСОВ РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКОГО ГИС-АНАЛИЗА (НА ПРИМЕРЕ ВЕНГЕРОВСКОГО РАЙОНА НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ)<sup>1</sup>

*Ин-т геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск;  
dasha.chupina@gmail.com*

### Постановка проблемы

Появление персональных компьютеров и бурный рост новейших технологий, доступных каждому специалисту в области наук о Земле, сделали рентабельным (по соотношению трудозатраты/результат) целый ряд задач, которые до этого не могли быть реализованы в полной мере из-за трудоемкости или необеспеченности технологическими возможностями. К таким задачам относятся и та, которой посвящена эта статья: автоматическое геоморфологическое картографирование. В аспекте фактологического обеспечения, предпосылкой для решения этой задачи стало появление цифровых моделей рельефа (ЦМР) общего доступа через Интернет (SRTM и т. п.). В методическом отношении такой предпосылкой явилось возникновение разнообразных программных средств, ориентированных на работу с сеточными и растровыми форматами, в которых представлены ЦМР. В данной работе операции с сетками (формат GRID) осуществляются в программном пакете ArcGIS 9.3 компании ESRI, а операции с растрами (формат GeoTIFF) в системе обработки цифровых изображений ENVI 4.5, разработанной компанией ITT Visual Information Solutions. Для того чтобы охарактеризовать предлагаемый подход к геоморфологическому картографированию на основе технологий ГИС и ДЗ, прежде всего рассмотрим современные представления об объекте исследования.

В классической геоморфологии сложилось представление о триаде рельефа, т.е. рельеф воспринимается через три дополняющих друг друга характеристики: форма, генезис, возраст. При этом разными авторами этим трем признакам придается разное значение. Многие исследователи считают, что морфологические классификации играют вспомогательную роль, а основное значение следует придавать историко-генетическому подходу [1]. Соответственно, структура рельефа рассматривается ими в виде

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-31101).