

УДК 532.593.2

## О КРИТЕРИЯХ ПЕРЕХОДА ОПРОКИДЫВАЮЩЕГОСЯ БОРА В ВОЛНООБРАЗНЫЙ

© 2015 г. Е. Н. Пелиновский<sup>1–3</sup>, Е. Г. Шургалкина<sup>1,2</sup>, А. А. Родин<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.А. Алексеева  
603950 Нижний Новгород, ул. Минина, 24

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН  
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет – Высшая школа экономики  
603005 Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12

<sup>4</sup>Институт кибернетики, Таллинский технологический университет Таллин, Эстония EE-12616, ул. Академия, 21  
E-mail: pelinovsky@hydro.appl.sci-nnov.ru  
E-mail: eshurgalina@mail.ru  
E-mail: xmrarro@gmail.com

Поступила в редакцию 25.08.2014 г., после доработки 24.09.2014 г.

Собраны натурные данные волнообразных и опрокидывающихся боров, зафиксированные в прибрежной зоне и устьях рек. Имеющиеся критерии по разделению двух данных типов боров в зависимости от отношения высоты бора к невозмущенной глубине бассейна применены к собранным данным. Показано, что критерий  $H/h > 1.5$  ( $H$  – высота бора, отсчитываемая от дна,  $h$  – невозмущенная глубина бассейна) достаточен для грубого разделения боров по их типу.

**Ключевые слова:** опрокидывающийся бор, волнообразный бор, натурные данные, теория мелкой воды.

DOI: 10.7868/S0002351515050090

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В природных условиях на мелководье могут существовать два типа ударных волн (боров): опрокидывающиеся и волнообразные. Зачастую их можно встретить практически в одном месте, что иллюстрируется фотографией (рис. 1), взятой с сайта ([www.surfalaska.net](http://www.surfalaska.net)). Если в центре, где глубина больше, распространяется волнообразный бор, то ближе к берегам залива отчетливо видна смена режима с образованием опрокидывающегося бора. Формирование обоих типов бора, в частности, при вхождении приливной волны или цунами в реку, хорошо понятно из физических соображений. Если нелинейность волны достаточно мала, то дисперсия препятствует обрушению приливной волны и способствует образованию волнообразных осцилляций на теле длинной волны, преобразующихся в дальнейшем в последовательность солитонов. Этот процесс качественно хорошо описывается известным решением уравнения Кортевега-де Вриза [1]. Если же нелинейность велика, то дисперсия не может препятствовать быстрому укрупнению фронта

волны и его обрушению. Этот процесс также хорошо изучен в рамках гиперболической системы мелкой воды [2, 3]. К сожалению, большинство известных прикладных численных моделей динамики волн в прибрежной зоне не могут учесть оба этих эффекта вместе. Наиболее распространены для описания приливных волн и волн цунами



Рис. 1. Фотография бора в заливе Кука, Аляска (автор: Scott Dickerson / [www.surfalaska.net](http://www.surfalaska.net)).

## Натурные данные приливных боров

№	Река, дата	$h$ , м	$H$ , м	$H/h$	Тип бора	Ссылка
1	Seine River (река Сена, Франция)	1	1.9	1.9	О	[11]
2	Sélune River (река Селюн, Франция), 24.09.2010	0.38	0.72	1.89	О	[12]
3	Sélune River (река Селюн, Франция), 25.09.2010	0.33	0.74	2.25	О	[12]
4	Garonne River (река Гаронна, Франция), Podensac 10.09.2010	3.1	4.2	1.35	В	[13]
5	Garonne River (река Горанна, Франция), Podensac, 04.09.2010	1.85	2.1	1.13	В	[13]
6	Qiantang River (река Цяньган, Китай), октябрь 2007	1	4	4	О	[14]
7	Rio Mearim (река Мearин, Бразилия), 30.01.1991	1.8	2.7	1.5	В/О	[15]
8	Dee river (река ДИ, Великобритания), 15.05.2002	0.8	1.05	1.3	В	[16]
9	Garonne river (река Гаронна, Франция), 10.09.2010	1.74	2.3	1.32	В	[17]
10	Dee river (река ДИ, Великобритания), 22.09.1972	1	1.8	1.8	В	[18]
11	Dordogne river (река Дордонь, Франция), 26.04.1990	1.12	1.602	1.43	В	[10]
12	Daly river (река Дэйли, Австралия), 02.06.2003	1.5	1.779	1.19	В	[10]
13	Qiantang River (река Цяньган, Китай), 19.09.2009	7.12	7.90	1.1	В	[19]
14	Garonne River (река Гаронна, Франция), 07.06.2012	2.65	3.17	1.2	В	[20]
15	Garonne River at Arcins (река Гаронна, Франция), 19.10.2013	2.05	2.35	1.15	В	[21]
16	Dee River (река Ди, Великобритания), 06.09.2003	0.72	1.17	1.63	О	[16], [ 21]
17	Sée River (река Сэ, Франция), 07.05.2012	0.9	1.46	1.62	В	[21], [ 22]

Примечание. Опрокидывающийся – О, волнообразный – В.

уравнения мелкой воды, в которых сглаживание фронта волны осуществляется введением горизонтальной вязкости (диффузии); при этом в реальных акваториях пространственный шаг оказывается достаточно большим, так что нелинейная деформация волны не очень сильно заметна [4]. Напротив, в новых моделях нелинейно-дисперсионной теории (уравнения Буссинеска разного порядка) хорошо прописывается формирование волнообразного бора, в частности, во время цунами 2004 г. в Индийском океане [5], и в них обрушение волны не наблюдается. Нелинейно-дисперсионные модели не обладают значительным быстродействием и поэтому применяются реже.

В этой связи хорошо бы иметь простой критерий, который позволил бы судить о правомочности применения той или иной модели к описанию реальной ситуации. Такие критерии известны по результатам многочисленных лабораторных экспериментов в идеализированных условиях одномерного потока [2, 6–9]. Однако, насколько нам известно, они не проверялись по натурным данным волновых процессов в прибрежной зоне. Целью данной заметки является анализ натуральных данных, позволяющий судить о применимости критериев, полученных в лабораторных условиях. Это может помочь выполнить предварительное районирование водных бассейнов по типу распространяющихся в них волн.

## 2. НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ

К сожалению, фотографии различных форм волн цунами очень редки; они зачастую являются отрывочными и не содержат информации о глубине места и высоты волны. В то же время существует достаточно большая коллекция приливных боров, образующихся при вхождении прилива в реку. Классическим приливным бором считается бор на реке Северн в Англии, имеющий высоту более двух метров в период весенних сизигийных приливов ниже по течению от города Глостер. Приливные боры, в отличие от цунами или волн, образовавшихся при обрушении плотины, обладают весьма полезным свойством – периодичностью своего появления, что позволяет относительно быстро набрать большое число данных. Многие из них описаны в книге [10] и для них даны количественные параметры. Поэтому приливные боры и были выбраны для анализа типов обрушения мелководных волн. Из разных источников собраны натурные данные зарегистрированных приливных боров в устьях рек Земного шара. Они представлены в таблице. Все эти случаи подбирались таким образом, чтобы не было повторных данных, когда измерения проводятся в одном и том же месте и в близкие даты, когда показатели примерно одинаковые. В качестве входных параметров выступают тип и высота бора относительно дна ( $H$ ), а также глубина водоема перед фронтом бора ( $h$ ).



Рис. 2 Распределения данных наблюдений по параметру  $H/h$ .

Общее число данных в таблице – 17, из них пять случаев опрокидывающегося бора, 11 – волнообразного бора, и один – промежуточный. В какой-то степени можно говорить о имеющихся данных как о статистической презентативной выборке.

### 3. КРИТЕРИИ ПЕРЕХОДА ВОЛНООБРАЗНОГО БОРА В ОПРОКИДЫВАЮЩИЙСЯ

Имеющиеся критерии основаны на различных параметрах волнового потока, и наиболее простые из них используют отношение высоты бора, отсчитываемого от дна ( $H$ ), к невозмущенной глубине бассейна ( $h$ ). Так, например, в работе [7] приводится следующий простой критерий: если  $H/h < 1.28$ , то бор считается волнообразным; если же  $H/h > 1.75$ , то бор опрокидывающийся (гидравлический прыжок), а в промежутке наблюдаются волнообразные боры с эффектами обрушения. В книге [2] приведен более общий критерий: если  $H/h < 1.5$ , то бор считается волнообразным, если же  $H/h > 1.5$ , то бор опрокидывающийся. В экспериментальной работе [8] критерий Стокера дополняется еще одним условием: если  $H/h > 9$ , то реализуется случай параболической волны (как в волне разрушения плотины).

Критерий Фавра обобщен в работе [9]. В этой работе за смену режимов бора отвечает схожий параметр  $\Delta$ , определяемый как  $\Delta = (H - h)/h$ . При этом, если  $\Delta \leq 0.3$ , то бор определяется как волнообразный, при  $\Delta \geq 0.7$  бор имеет обрушенный фронт. При промежуточных значениях параметра  $\Delta$  наблюдаются оба эффекта – как обрушение, так и дисперсионный распад. Приводя значения параметра  $\Delta$  к предыдущему случаю, интервалы нашего критерия сдвигаются: волнообразный бор должен проявляться при  $H/h < 1.3$ , а опрокидывающимся может считаться тот бор, у которого  $H/h > 1.7$ .

В то же время в некоторых работах [6] на основе наблюдаемых данных движения бора в реках и лотках был получен критерий перехода в зависимости от значения числа Фруда. Волнообразный режим бора проявлялся при значениях  $Fr < 1.8$

( $H/h < 1$ ). Если  $Fr > 1.8$  (или  $H/h < 1$ ), бор переходил в режим опрокидывающегося.

Натурные данные, содержащиеся в таблице, могут быть проверены на выполнение данных критериев (рис. 2). Как видим, волнообразные и опрокидывающиеся боры хорошо разделяются пороговым значением  $H/h = 1.5$ , за исключением одного случая с  $H/h = 1.8$ , который находится на пороге интервала Фавра–Телес да Сильва. В целом можно сказать, что критерий  $H/h = 1.5$  может использоваться для грубой оценки типа волнового движения, и, соответственно, выбора подходящей численной модели для описания длинноволновой динамики.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, собранные данные наблюдений приливных боров подтверждают, что представленные критерии смены характера бора выполняются практически во всех случаях, а наиболее опасные опрокидывающиеся боры (с большим перепадом высот) случаются в таких реках, как Сена, Ди, Селюн, Цяньтан и Меарин. На основании натуральных данных критерий  $H/h = 1.5$  может использоваться для грубой оценки типа волнового движения и, соответственно, выбора подходящей численной модели для описания длинноволновой динамики.

Данная работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (14-02-00983, 14-05-00092, 15-35-20563, 15-55-45053), МК-1146, 2014.5 (АРИЕШ), а также гранта ЕТФ 8870 (АР), гос. контракта 2014.133(ЕП), Volkswagen Foundation и фонда “Династия” (ЕШ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В.Е., Мананов С.В., Новиков С.П., Питаевский Л.П. Теория солитонов. М.: Наука, 1980, 319 с.
2. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. М.: ИЛ. 1959, 618 с.
3. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. Горький: ИПФ АН СССР, 1982, 226 с.
4. Zahibo N., Pelinovsky E., Talipova T. et al. Analytical and numerical study of nonlinear effects at tsunami modelling // Appl. Mathem. Comput. 2006. V. 174. № 2. P. 795–809.
5. Dao M.H., Tkalich P. Tsunami propagation modelling – a sensitivity study // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2007. V. 7. P. 741–754.
6. Docherty N.J., Chanson H. Characterisation of Unsteady Turbulence in Breaking Tidal Bores including the Effects of Bed Roughness // Hydraulic Model Report No. CH76/10. Brisbane: University of Queensland, 2010. 112 p.
7. Favre H. Etude Théorique et Expérimentale des Ondes de Translation dans les Canaux Découverts (Theoretical and Experimental Study of Travelling Surges in Open Channels). Paris: Dunod Edition. 1935. 215 p.

8. *Накамура С.* О гидравлическом боре и применении результатов его изучения к проблеме возникновения и распространения цунами. Волны цунами // Труды СахКНИИ. Южно-Сахалинск. 1973. Вып. 32. С. 129–151.
9. *Teles Da Silva A.F., Peregrine D.H.* Nonsteady computations of undular and breaking bores. Proc. 22nd Int. Cong. Coastal Eng. Delft: ASCE Publ. 1990. V. 1. P. 1019–1032.
10. *Chanson H.* Tidal Bores, Aegir, Eagre, Mascaret, Porroca: Theory and Observations. Singapore: World Scientific. 2011. 220 p.
11. *Chanson H.* Photographic Observations of Tidal bores (Mascarets) in France. Hydraulic Model Report № CH71/08, Brisbane: University of Queensland, 2008. 104 p.
12. *Mouaze D., Chanson H., Simon B.* Field measurements in the tidal bore of the sélune river in the bay of Mont Saint Michel (September 2010). Report CH81/10. Brisbane University of Queensland, 2010. 72 p.
13. *Bonneton P., Van de Loock J., Parisot J-P. et al.* On the occurrence of tidal bores – The Garonne River case // J. Coastal Res. 2011. Issue 64. P. 1462–1466.
14. *Cun-Hong P., Hai-Yan L.* 2d numerical simulation of tidal bore on Qiantang river using KFVS scheme. Coastal Engineering Proceedings. 2010. V. 32. doi:10.9753/icce.v32.currents.29.
15. *Kjerfve B., Ferreira H.O.* Tidal bores: First ever measurements // J. Brazil. Assoc. Advanc. Sci. 1993. V. 45. № 2. P. 135–137.
16. *Simpson J.H., Fisher N.R., Wiles P.* Reynolds stress and TKE production in an estuary with a tidal bore // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2004. V. 60. № 4. P. 619–627.
17. *Simon B., Lubin P., Reungoat D., Chanson H.* Turbulence measurements in the Garonne River tidal bore: First observations, Proc. 34th IAHR World Congress, Red Hill Queensland, Engineers Australia. 2011. P. 1141–1148.
18. *Chanson H.* An Experimental Study of Tidal Bore Propagation: the Impact of Bridge Piers and Channel Constriction, Hydraulic Model Report No. CH74/08. Brisbane University of Queensland, 2009. 109 p.
19. *Zhu X.-H.* Observation and dynamics of the tidal bore in the Qiantang River, China. Int. Conference on Mechanic Automation and Control Engineerin, July 15–17, 2011. Inner Mongolia–China: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Publ., 2011. P. 7496–7499.
20. *Reungoat D., Chanson H., Caplain B.* Sediment Processes and Flow Reversal in the Undular Tidal Bore of the Garonne River (France) // Environ. Fluid Mechan. 2014. V. 14. № 3. P. 591–616.
21. *Reungoat D., Chanson H., Keevil C.* Turbulence, Sedimentary Processes and Tidal Bore Collision in the Arcins Channel, Garonne River (October 2013). Hydraulic Model Report No. CH94/14. Brisbane: The University of Queensland, 2014. 145 p.
22. *Furgerot L., Mouaze D., Tessier B. et al.* Suspended Sediment Concentration in Relation to the Passage of a Tidal Bore (Sée River Estuary, Mont Saint Michel, NW France). Proc. Coastal Dynamics. Arcachon, France, 24–28 June. Bordeaux University – SHOM 2013. P. 671–682.

## Criteria for the Transition from a Breaking Bore to an Undular Bore

E. N. Pelinovsky<sup>a, b, c</sup>, E. G. Shurgalina<sup>a, b</sup>, and A. A. Rodin<sup>a, d</sup>

<sup>a</sup> *Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, Nizhny Novgorod, 603950 Russia  
e-mail: pelynovsky@hydro.appl.sci-nnov.ru*

<sup>b</sup> *Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

<sup>c</sup> *Higher School of Economics, National Research University,  
ul. Bolshaya Pecherskaya 25/12, Nizhny Novgorod, 603005 Russia*

<sup>d</sup> *Institute of Cybernetics, Tallinn University of Technology, Akadeemia tee 21, Tallinn, 12618 Estonia  
e-mail: eshurgalina@mail.ru  
e-mail: xmrarro@gmail.com*

Received August 25 2014; in final form, September 24 2014

**Abstract**—Field data on undular and breaking bores observed in a coastal zone and river estuaries were collected. The existing criteria of distinction of these two regimes of bores, which depend on the ratio between the bore height and unperturbed water depth, are applied to the collected data. It is shown that criterion  $H/h > 1.5$  (where  $H$  is bore height measured from the bottom and  $h$  is unperturbed depth of reservoir) is sufficient for the rough separation of the bores by their type.

*Key words:* breaking bore, undular bore, shallow water theory, field data