

## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ВОЛН К ПАРАМЕТРИЗАЦИЯМ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Я. В. Стригунова<sup>1</sup>, К. Ю. Булгаков<sup>2</sup>, А. В. Еремина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

## SENSITIVITY OF WAVE FORECAST MODEL TO PARAMETRIZATIONS OF PLANETARY BOUNDARY LAYER

Ya. V. Strigunova<sup>1</sup>, K. Yu. Bulgakov<sup>2</sup>, A. V. Eremina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Рассматривается влияние параметризаций планетарного пограничного слоя на прогноз волн в Балтийском море. Выявлено, что наименьшую ошибку воспроизведения высоты доминантной волны обеспечивают 2 схемы ППС.*

*The influence of PBL parametrizations on wave forecast in the Baltic Sea is considered. It was found out that minimal error of reproduction significant wave height is provided by 2 schemes of PBL.*

Ветровые волны – феномен, оказывающий существенное влияние на человеческую деятельность в океане. Предупреждение техногенных катастроф, которые могут быть вызваны ветровыми волнами, является одной из важных задач геофизической гидромеханики.

В настоящий момент прогноз морских волн осуществляется на основе спектральных моделей, которые рассчитывают эволюцию спектра волнения. Входными данными для них являются поля скорости и направление ветра, температуры воздуха и его влажности над поверхностью. Данные поля являются результатами работы прогностических моделей атмосферной циркуляции. Качество воспроизведения структуры вышеуказанных характеристик в приводном слое определяется параметризациями планетарного пограничного слоя, используемые данными моделями. Выбор оптимального алгоритма для описания процессов обмена в пограничном слое атмосферы определяется в общем поставленной задачей (например, определенным пространственным разрешением). При осуществлении прогноза ветровых волн задача выбора оптимальной параметризации пограничного слоя усложняется, так как кроме реалистичного описания структуры пограничного слоя такие параметризации должны обеспечивать качественное воспроизведение процессов передачи энергии волнам. Более детальное описание этого взаимодействия указано в [1-2].

Оценка чувствительности прогностической системы атмосфера/волны к выбору параметризации пограничного слоя проводилась с помощью модельной системы, состоящей из компонент WRF [3] и WAVEWATCH [4].

В модели WRF заложена возможность выбора следующих схем планетарного пограничного слоя:

-алгоритмы, основанные на уравнении кинетической энергии турбулентности: Mellor-Yamada-Janjic (MYJ), Mellor-Yamada-Nakanishi Niino (MYNN), Quasi-normal Scale Elimination (QNSE). Mellor-Yamada-Janjic основана на модели Mellor-Yamada с 1.5 порядком замыкания с использованием масштаба турбулентных образований. Mellor-Yamada-Nakanishi Niino отличается от первой тем, что в нее внедрены данные, полученные в ходе LES-моделирования. Последняя схема похожа на первую, но в нее встроены учет флуктуаций в устойчивых слоях.

-алгоритмы нелокального замыкания. Основное различие в них заключается в описании К – профиля. В случае схемы Yonsei University (YSU) он определяется как функция числа Ричардсона для свободной атмосферы, в AsymmetricConvectionModelV.2 (ACM2) восходящие потоки взаимодействуют между поверхностным слоем и каждым слоем выше, тогда как потоки вниз распространяются от одного слоя до другого непосредственно нижележащего слоя.

TotalEnergy-MassFlux (TEMF) отличается от схем локального замыкания, тем что использует помимо кинетической энергии турбулентности еще и потенциальную, то есть в уравнении для полной энергии в правую часть добавляется поток массы, который рассматриваются как разница между искомой величиной на исходном уровне и ее значением на вышележащем.

С различными комбинациями параметризаций атмосферной компоненты была проведена серия запусков совместной модели с целью оценки чувствительности системы атмосфера/морские волны к способу параметризации пограничного слоя атмосферы, а также последующим выбором оптимальной параметризации. Была рассчитана среднеквадратическая ошибка (СКО) воспроизведения высоты доминантной волны по данным буев, принадлежащих FMI (Finnish Meteorological Institute). Их координаты указаны в таблице 1.

Таблица 1. Используемые буи для верификации

| №                                | 1                                  | 2                             | 3                          | 4                          |
|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Область, в которой находится буй | Центральная часть Балтийского моря | Финский залив                 | Ботнический залив, юг      | Ботнический залив, север   |
| Код буя                          | 134220                             | 134221                        | 134246                     | 137228                     |
| Координаты                       | 59°15' с.ш.<br>21°00' в.д.         | 59°58'<br>с.ш.<br>25°14' в.д. | 61°48' с.ш. 20°14'<br>в.д. | 64°41' с.ш.<br>23°14' в.д. |

Были выбраны два наиболее показательных случая сильного волнения. Первый случай – шторм в Балтийском море, наблюдающийся с 18 по 21 августа 2014 года (рис. 1).

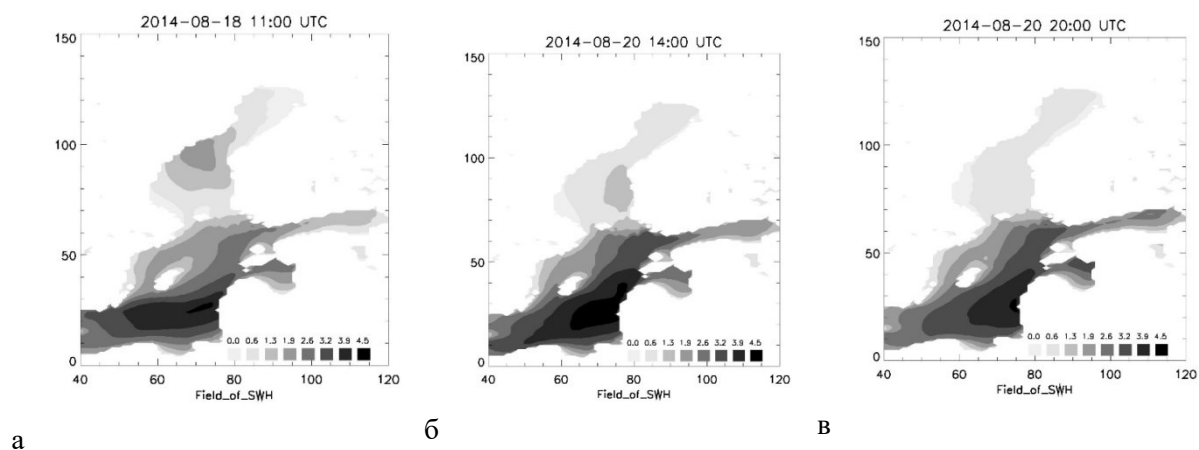


Рис. 1. Поле высоты доминантной волны. а – появление волн более 4.5 м, б - пик, в – последнее отображение волн более 4.5 м.

С 18 по 21 августа в Балтийском море фиксируется высота доминантной волны более 4 м. Рассматриваемое волнение имеет несколько пиков, которые сосредоточены, в основном, в южной части. В Ботническом заливе волны не превышают 3 м, однако, на всем рассматриваемом временном интервале такое волнение наблюдается лишь несколько часов, в то время как в Финском заливе эта высота волн отмечается гораздо чаще. В таблице 2 представлены минимальная и максимальная СКО.

Таблица 2. Среднеквадратическое отклонение высоты доминантной волны для Балтийского моря в период 11-20.08.2014

| 134220        |             | 134221        |             |
|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Варианты      | СКО         | Варианты      | СКО         |
| ACM2+PX       | <b>0,43</b> | ACM2+PX       | 0,45        |
| MYJ+ETA       | <b>0,43</b> | MYJ+ETA       | <b>0,3</b>  |
| MYNN_2.5+MYNN | 0,54        | MYNN_2.5+MYNN | 0,43        |
| QNSE          | 0,47        | QNSE          | 0,46        |
| TEMF          | 0,7         | TEMF          | 0,44        |
| YSU+MM5       | 0,55        | YSU+MM5       | 0,35        |
| 134246        |             | 137228        |             |
| ACM2+PX       | 0,52        | ACM2+PX       | 0,39        |
| MYJ+ETA       | 0,39        | MYJ+ETA       | 0,36        |
| MYNN_2.5+MYNN | 0,44        | MYNN_2.5+MYNN | 0,35        |
| QNSE          | 0,48        | QNSE          | 0,57        |
| TEMF          | 0,39        | TEMF          | 0,41        |
| YSU+MM5       | <b>0,38</b> | YSU+MM5       | <b>0,33</b> |

Во втором эксперименте (рис. 2) рассматривается эволюция волн с 4 по 10 октября 2014 года.

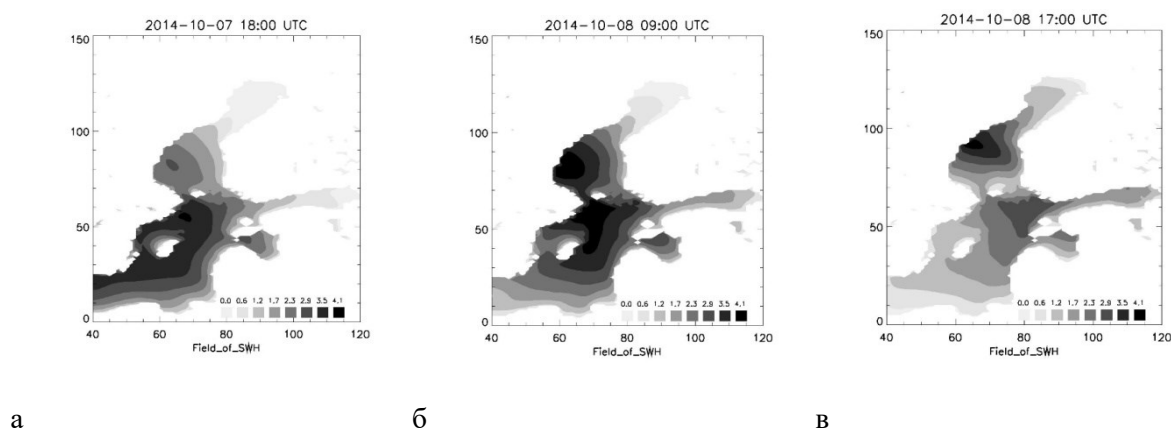


Рис. 2. Поле высоты доминантной волны. а – появление волн более 4.5 м, б - пик, в – последнее отображение волн более 4.5 м.

При формировании шторма было замечено 2 области формирования волнения: Ботнический залив и юг Балтики. В первом случае возникали очаги разной интенсивности волнения, часть из которых даже проникала в центр, где и происходила наибольшая интенсификация волн до высоты более 4 м. Для Финского залива, с учетом его конфигурации, ситуация иная – после длительного периода относительно спокойного волнения, ослабленная часть волн, развившихся в центре, наконец прошла по всему заливу. Расчётные значения СКО приведены в таблице 3.

Таблица 3. Среднеквадратическое отклонение высоты доминантной волны для Балтийского моря в период 4-10.10.2014

| 134220        |             | 134221        |             |
|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Варианты      | СКО         | Варианты      | СКО         |
| ACM2+PX       | <b>0,33</b> | ACM2+PX       | 0,35        |
| MYJ+ETA       | 0,38        | MYJ+ETA       | 0,38        |
| MYNN_2.5+MYNN | 0,41        | MYNN_2.5+MYNN | <b>0,34</b> |
| QNSE          | 0,45        | QNSE          | 0,37        |
| TEMF          | 0,68        | TEMF          | 0,49        |
| YSU+MM5       | 0,4         | YSU+MM5       | 0,36        |
| 134246        |             | 137228        |             |
| ACM2+PX       | <b>0,45</b> | ACM2+PX       | 0,43        |
| MYJ+ETA       | 0,48        | MYJ+ETA       | 0,39        |
| MYNN_2.5+MYNN | 0,55        | MYNN_2.5+MYNN | 0,41        |
| QNSE          | 0,55        | QNSE          | <b>0,35</b> |
| TEMF          | 0,7         | TEMF          | 0,37        |
| YSU+MM5       | 0,47        | YSU+MM5       | 0,38        |

**Заключение.**

Из таблиц видно, что наибольшая разница между СКО достигает 0.4 м. Таким образом можно говорить о том, что существует чувствительность модельной системы атмосфера/океан к выбору параметризации, описывающей пограничный слой. Можно выделить 2 схемы ППС, при использовании которых воспроизведение высоты доминантной волны имело наименьшую СКО (Mellor-Yamada-Janjic и Yonsei University).

**Литература**

1. Чаликов Д.В., Булгаков К.Ю. Ветровые волны как элемент гидродинамической системы океан–атмосфера // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 3. С. 386–391.
2. Chalikov D., Rainchik S. Coupled numerical modelling of wind and waves and the theory of the wave boundary layer // Boundary.LayerMeteorol. 2010. V. 138. Issue 1. P. 1–41.
3. Michalakes J., Dudhia J., Gill D., Henderson T., Klemp J., Skamarock W., Wang W. The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance // Proceedings of the 11th ECMWF Workshop on the Use of HighPerformance Computing In Meteorology, 25—29 October 2004, Reading U.K. Ed. George Mozdzynski.
4. Tolman H. L. A third generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents // J. Phys. Oceanogr. 1991. V. 21. P. 782—797.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00124).*

*The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 16-17-00124).*