

УДК 551.466.31

© Я. В. Стригунова¹, К. Ю. Булгаков²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

² Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН, г. Москва

strigunova.jana@yandex.ru, bulgakov.kirill@gmail.com

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ВОЛН К ПАРАМЕТРИЗАЦИЯМ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Статья поступила в редакцию 18.10.2018, после доработки 27.07.2019

Исследуется влияние разных вариантов параметризации планетарного пограничного слоя атмосферы в системе «морские волны – атмосферная циркуляция» на качество воспроизведения эволюции ветрового волнения. Описывается система, состоящая из модели WAVEWATCH (морские волны) третьего поколения и модели региональной циркуляции WRF (атмосфера), адаптированная для региона Балтийского моря. Рассматриваются схемы параметризации планетарного пограничного слоя атмосферы, используемые в модели WRF. Из всех проведенных экспериментов представлены два наиболее показательных случая со штормовыми условиями, наблюдающимися в 2014 году: 11–20 августа и 4–10 октября. Сравнивается среднеквадратическая ошибка воспроизведения высоты доминантной волны, рассчитанной по данным с 4 автоматизированных буйев, принадлежащих FMI (*Finnish Meteorological Institute*), которые расположены в центре Балтийского моря, в северной и южной части Ботнического залива и в Финском заливе. Оценивается чувствительность воспроизведения высоты значительной волны к разным способам задания планетарного пограничного слоя атмосферы. Рассматривается эволюция штормового волнения в каждой точке, где находится буй. Обосновывается выбор параметризации, при которой наиболее точно воспроизводится ветровое волнение.

Ключевые слова: совместная модель, параметризация атмосферного пограничного слоя, высота доминантной волны.

Ya. V. Strigunova¹, K. Yu. Bulgakov²

¹ Russian State Hydrometeorology University, St. Petersburg, Russia

² Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

SENSITIVITY OF WAVE FORECAST MODEL TO PARAMETRIZATIONS OF PLANETARY BOUNDARY LAYER

Received 18.10.2018, in final form 27.07.2019

The influence of different versions of the planetary boundary layer parameterization in the model of system “Wave – Atmosphere” on the quality of wind wave simulation is investigated. The system consisting of components: WAVEWATCH (wave) / WRF (atmosphere) adapted for the Baltic Sea is described. The schemes of the planetary boundary layer parameterization used in the WRF are considered. From all experiments are selected two cases with stormy conditions observed in 2014: from 11 to 20 August and from 4 to 10 October. The comparison is produced by root-mean-square error of significant wave height simulation calculated according to automated FMI buoys located in Northern Baltic Proper, Bothnian Sea, Bay of Bothnia, Gulf of Finland. The sensitivity of significant wave height reproduction to different ways to PBL is evaluated. The evolution of storm waves at each buoy point is considered. The selection of parameterization with less errors in wind wave simulation is justified.

Key words: couple model, boundary layer parameterization, significant wave height.

Ссылка для цитирования: Стригунова Я.В., Булгаков К.Ю. Чувствительность модели прогноза волн к параметризациям пограничного слоя атмосферы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 3–13.

For citation: Strigunova Ya.V., Bulgakov K.Yu. Sensitivity of wave forecast model to parametrizations of planetary boundary layer. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 4, 3–13.

DOI: 10.7868/S2073667319040014

1. Введение

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

В настоящий момент прогноз морских волн осуществляется спектральными моделями, которые рассчитывают эволюцию спектра волнения. Входными параметрами для них являются поля скорости и направление ветра, температура воздуха и его влажности над поверхностью. Чаще всего эти величины получают из моделей прогноза погоды. Качество воспроизведения структуры вышеуказанных характеристик у поверхности моря определяется параметризацией планетарного пограничного слоя (ППС). К настоящему времени существует большое количество подходов к описанию процессов в приводном слое атмосферы как части ППС. Выбор параметризации физического процесса должен производиться с учетом ряда факторов, например, географией моделируемого района [1]. Адаптация гидродинамической атмосферной модели (а именно, выбор оптимальной параметризации) для успешного прогноза ветровых волн усложняется тем, что кроме реалистичного описания структуры пограничного слоя такие схемы должны обеспечивать качественное воспроизведение процессов передачи энергии волнам. Более детальное описание этого взаимодействия указано в [2–5].

2. Система «атмосфера-морские волны»

Оценка чувствительности прогностической системы атмосфера/волны к выбору параметризации пограничного слоя проводилась на примере объединенных моделей атмосферы WRF [6] и морских волн WAVEWATCH [7].

Модель атмосферной циркуляции – WRF-ARW (Advanced Research WRF) разработана в Национальном центре исследований атмосферы США. Модель основана на полных уравнениях движения для сжимаемой негидростатической жидкости. Аппроксимация конечно-разностных производных осуществляется на C сетке со схемой интегрирования по времени Рунге-Кутты 2-го и 3-го порядка, с вертикальной η (гибридной) – системой координат. Более детальное изложение WRF 3.4.1 описано в [8]. WAVEWATCH III (v.3.14) – спектральная волновая модель третьего поколения. Ее отличие от предыдущих версий заключается во внедрении двухстороннего взаимодействия между сетками на каждом шаге по времени. Ее начальные настройки для региона Балтийского моря взяты из [9]. Угловое разрешение – 32 направления. Спектральное – 37 частотных диапазонов от 0.04 Гц. В начальный момент времени принималось отсутствие волнения. Взаимодействие WAVEWATCH III и WRF было рассмотрено на примере Балтийского моря. В модели WRF расчеты проводились на 3-х последовательно вложенных сетках разрешением 90 (количество точек – 40×39), 30 (67×64) и 10 км (130×139). Узлы последней сетки совпадали с узлами сетки WAVEWATCH, поэтому обмен полями в процессе расчета не требовал дополнительной интерполяции данных. Для начальных и боковых граничных условий модели WRF были использованы поля реанализа NCEP [10].

3. Параметризации ППС

Параметризации планетарного пограничного слоя основаны на K -теории, в которой рассчитываются потоки импульса, тепла, влаги при помощи коэффициентов турбулентной теплопроводности и вязкости. Их профили могут быть получены одним из следующих способов.

Алгоритм, основанный на решении уравнения для кинетической энергии турбулентности: Mellor-Yamada-Janjic (MYJ), Mellor-Yamada-Nakanishi Niino (MYNN), Quasi-normal Scale Elimination (QNSE). В Mellor-Yamada-Janjic заложена модель Mellor-Yamada с 1.5 порядком замыкания с использованием масштаба турбулентности. Mellor-Yamada-Nakanishi Niino отличается от первой тем, что в нее внедрены данные, полученные в ходе LES-моделирования. Последняя параметризация отличается от двух других тем, что в ней учтены внутренние волны, возникающие при устойчивой стратификации.

Алгоритмы нелокального замыкания. В схеме Yonsei University (YSU) k определяется как функция числа Ричардсона для свободной атмосферы. В Asymmetric Convection Model V.2 (ACM2) в нелокальном переносе учитывается диффузия вихря. Total Energy-Mass Flux (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.

4. Описание экспериментов и результаты

Описанные выше варианты параметризации ППС были применены для воспроизведения штормов, наблюдающихся в 2014 г. Исследования по воспроизведению штормового волнения уже проводились для региона Балтийского моря [11–14], однако в них не рассматривалась чувствительность параметризаций ППС на прогноз волн. Стоит отметить, что метод сопоставления результатов экспериментов с несколькими параметризациями уже внедрен в практику [15–17].

Была рассчитана среднеквадратическая ошибка (СКО) (табл. 2 и 3) воспроизведения высоты доминантной волны по данным буйев, принадлежащих FMI (Finnish Meteorological Institute) [18] с дискретностью в 30 мин. Их координаты указаны в табл. 1.

Таблица 1

Используемые буй для верификации
Buoys for the verification

№	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. 21°00' в.д.	59°58' с.ш. 25°14' в.д.	61°48' с.ш. 20°14' в.д.	64°41' с.ш. 23°14' в.д.

Таблица 2

Среднеквадратическое отклонение высоты доминантной волны для Балтийского моря в период 11–20.08.2014
Root-mean-square error of significant wave height in the Baltic Sea from 11 to 20 August 2014

134220		134221	
Вариант	СКО	Вариант	СКО
ACM2	0.43	ACM2	0.45
MYJ	0.43	MYJ	0.3
MYNN_2.5	0.54	MYNN_2.5	0.43
QNSE	0.47	QNSE	0.46
TEMF	0.7	TEMF	0.44
YSU	0.55	YSU	0.35
134246		137228	
ACM2	0.52	ACM2	0.39
MYJ	0.39	MYJ	0.36
MYNN_2.5	0.44	MYNN_2.5	0.35
QNSE	0.48	QNSE	0.57
TEMF	0.39	TEMF	0.41
YSU	0.38	YSU	0.33

Для первого случая жирным шрифтом выделены те комбинации, где СКО минимальна. Исходя из полученных результатов, наиболее приемлемой является схема ППС Mellor-Yamada-Janjic (рис. 1 и 2). Однако, как видно, для участка Ботнического залива она дает пониженную точность. Исходя из этого, на рис. 3 и 4 будет представлена не только Mellor-Yamada-Janjic, но и схема Yonsei University. Для каждой точки нанесена еще одна кривая – модельное распределение высоты доминантной волны с параметризацией ППС, имеющей максимальную СКО.

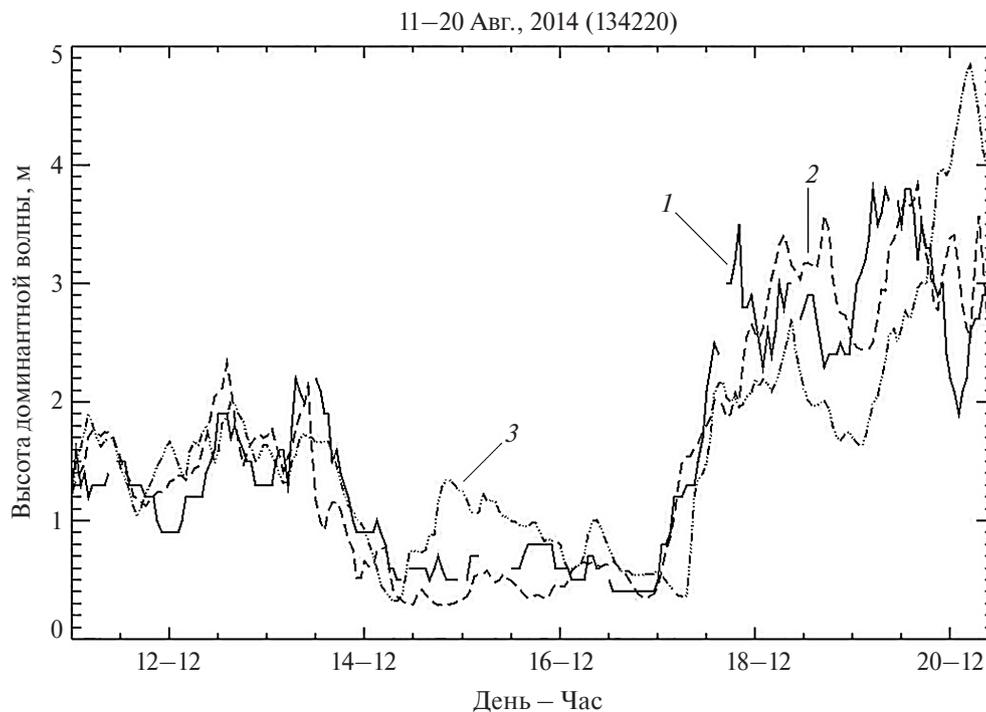


Рис. 1. Высота доминантной волны, построенная для буя в центре Балтики.

1 – фактические данные, 2 – данные модели (с MYJ), 3 – данные модели (параметризация ППС – TEMF).

Fig. 1. Significant wave height (m) in Northern Baltic Proper.

The measured data is shown with solid lines (1), the modeled results (PBL = MYJ) with dashed lines (2), the modeled results (PBL = TEMF) with dash-dot lines (3).

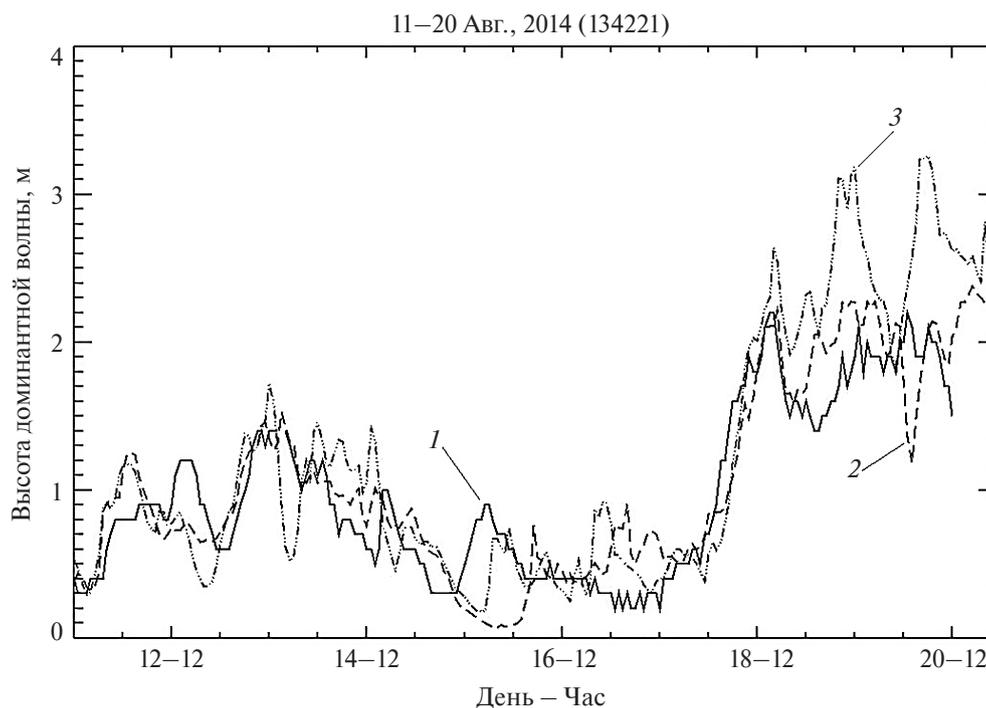


Рис. 2. Высота доминантной волны, построенная для буя в Финском заливе.

1 – фактические данные, 2 – данные модели (с MYJ), 3 – данные модели (параметризация ППС – QNSE).

Fig. 2. Significant wave height (m) in Gulf of Finland.

The measured data is shown with solid lines (1), the modeled results (PBL = MYJ) with dashed lines (2), the modeled results (PBL = QNSE) with dash-dot lines (3).

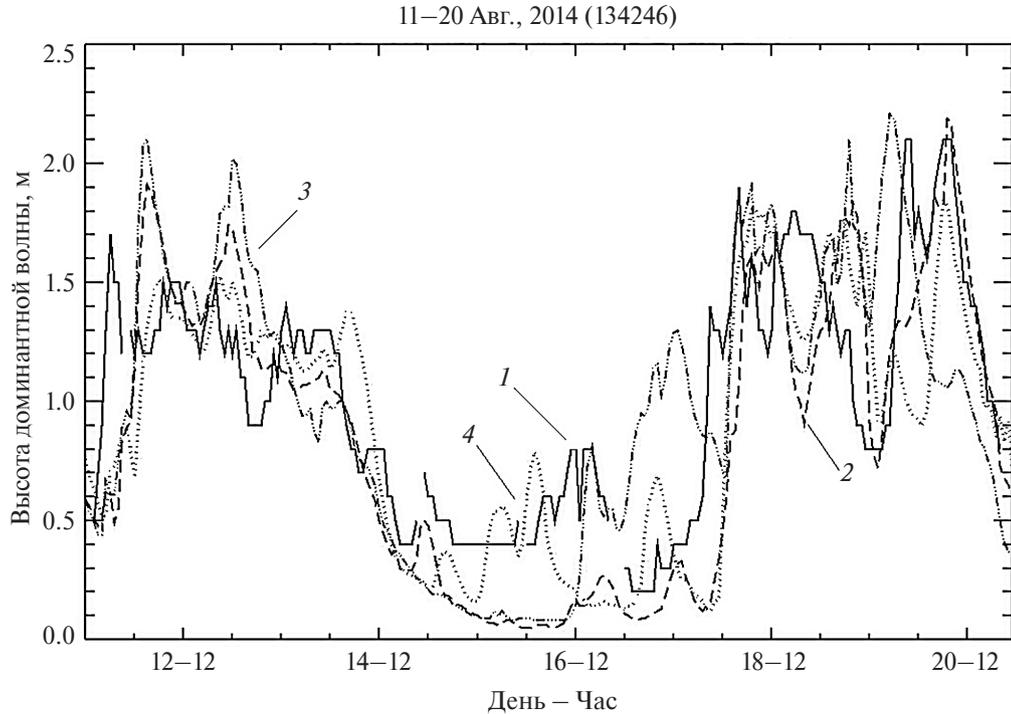


Рис. 3. Высота доминантной волны, построенная для буя в Ботническом заливе. 1 – фактические данные, 2 – данные модели (с MYJ), 3 – данные модели (параметризация ППС – QNSE), 4 – данные модели (схема YSU).

Fig. 3. Significant wave height (m) in Bothnian Sea.

The measured data is shown with solid lines (1), the modeled results (PBL = MYJ) with dashed lines (2), the modeled results (PBL = QNSE) with dash-dot lines (3), the modeled results (PBL = YSU) with black dots (4).

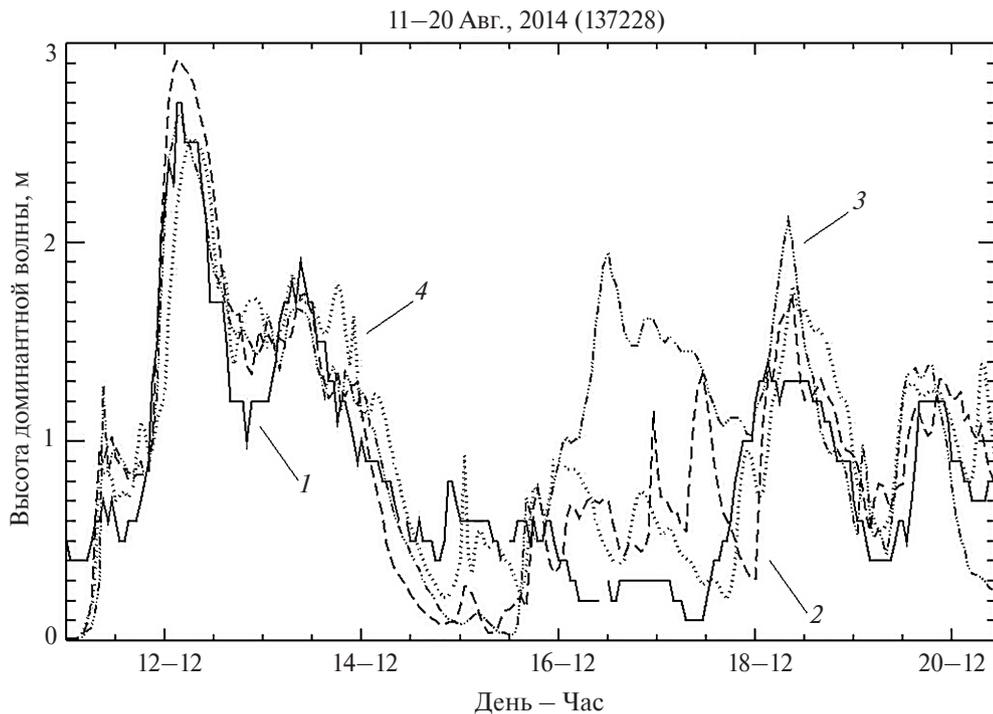


Рис. 4. Высота доминантной волны, построенная для буя на севере Ботнического залива. 1 – фактические данные, 2 – данные модели (с MYJ), 3 – данные модели (параметризация ППС – QNSE), 4 – данные модели (схема YSU).

Fig. 4. Significant wave height (m) in Bay of Bothnia. The measured data is shown with solid lines (1), the modeled results (PBL = MYJ) with dashed lines (2), the modeled results (PBL = QNSE) with dash-dot lines (3), the modeled results (PBL = YSU) with black dots (4).

Как видно, рассматриваемые схемы неплохо воспроизводят ветровое волнение. Однако для центра Балтийского моря (134220) отмечаются периоды, когда отклонение было значительным. Один из них – 15-го числа, когда разница составила более половины метра для высоты доминантной волны с параметризацией ППС Total-Energy Mass Flux, а для высоты волны с МУЖ-схемой оно равнялось несколько см. 19.08 фиксируется разность с данными наблюдений более 1 м с выбором варианта с максимальной СКО. После 12:00 20.08 модель с выбором параметризации Mellor-Yamada-Janjic воспроизвела высоту доминантной волны с меньшей ошибкой.

На участке Финского залива (134221) также 19 августа отмечается значительное расхождение между данными буюв и модельными (с выбором Quasi-normal Scale Elimination). 20.08 замечено отклонение в 1 м для обеих схем.

В точке на юге Ботнического залива (134246) разница между схемами варьируется от нескольких см до м. Продолжительное расхождение между фактическими данными 15–18.08 было минимально для схемы Yonsei University.

Для северной части залива (137228) максимальное значение высоты доминантной волны, зафиксированное утром 13.08, также хорошо отображено в модели. До 15.08 результаты запусков с рассматриваемыми схемами достаточно близки друг к другу. С 16 по 18.08 одна высота доминантной волны при параметризации QNSE намного больше отличается от наблюдений, чем остальные.

Во втором эксперименте рассматривается эволюция волн с 4 по 10 октября 2014 года с наибольшим значением высоты доминантной волны 7–9.10. Также результаты представлены в качестве табл. 3, рассчитанной СКО и рисунков 5–8 для 4-х районов Балтийского моря.

Таблица 3

Среднеквадратическое отклонение высоты доминантной волны для Балтийского моря в период 4–10.10.2014

Root-mean-square error of significant wave height in the Baltic Sea from 4 to 10 October 2014

134220		134221		134246		137228	
Вариант	СКО	Вариант	СКО	Вариант	СКО	Вариант	СКО
ACM2	0.33	ACM2	0.35	ACM2	0.45	ACM2	0.43
МУЖ	0.38	МУЖ	0.38	МУЖ	0.48	МУЖ	0.39
MYNN_2.5	0.41	MYNN_2.5	0.34	MYNN_2.5	0.55	MYNN_2.5	0.41
QNSE	0.45	QNSE	0.37	QNSE	0.55	QNSE	0.35
TEMF	0.68	TEMF	0.49	TEMF	0.7	TEMF	0.37
YSU	0.4	YSU	0.36	YSU	0.47	YSU	0.38

Как видно, для этого шторма уже предпочтительнее использовать Asymmetric Convection Model V.2. С учетом того, что в предыдущем случае наиболее подходящей стала схема МУЖ и отмечается небольшая разница между СКО этих двух схем, то далее эта параметризация также нанесена на графики. Для сравнения добавлена высота доминантной волны с параметризацией ППС, которая показала наименее точные результаты, то есть имела максимальную СКО для каждой точки.

В центральной части Балтики (134220) с начала запуска до 08.10 отмечается плавное увеличение высоты доминантной волны, а затем резкое ее снижение. До достижения максимума все схемы показывали приблизительно одинаковые результаты. К 08.10 модель с параметризацией ППС, имеющей максимальную СКО (TEMF), показывает отклонение от фактических данных, в то время как две других схемы демонстрируют примерно одинаковую разность с буйковыми данными.

В точке, расположенной в Финском заливе, высота волн не превышает двух метров. В основном временной ход воспроизведен хорошо, кроме периода с 07.10 по 08.10, где отклонение от наблюдаемых значений достигало полутора метров.

Для буюв в южной части Ботнического залива в начале эксперимента (05–07.10) все модельные высоты доминантных волн отличаются от фактической на 1.5–2 м. Такая же картина характерна для второй половины 10.10.

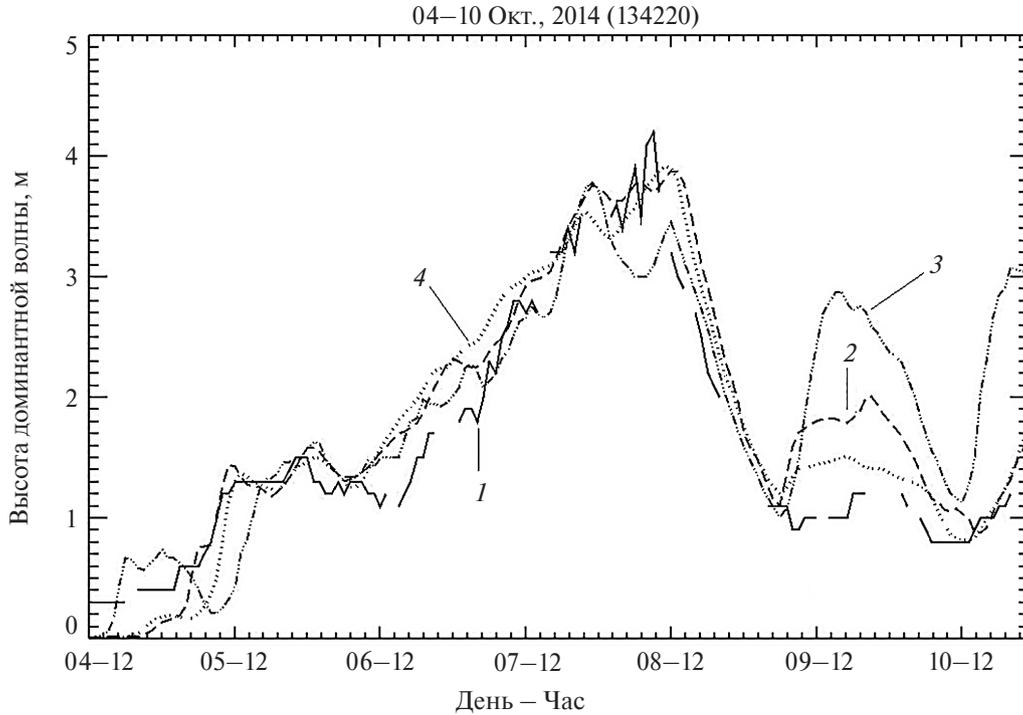


Рис. 5. Высота доминантной волны, построенная для буя в центре Балтики.

1 – фактические данные, 2 – данные модели (с MYJ), 3 – данные модели (параметризация ППС – TEMF), 4 – данные модели (схема ACM2).

Fig. 5. Significant wave height (m) in Northern Baltic Proper.

The measured data is shown with solid lines (1), the modeled results (PBL = MYJ) with dashed lines (2), the modeled results (PBL = TEMF) with dash-dot lines (3), the modeled results (PBL = ACM2) with black dots (4).

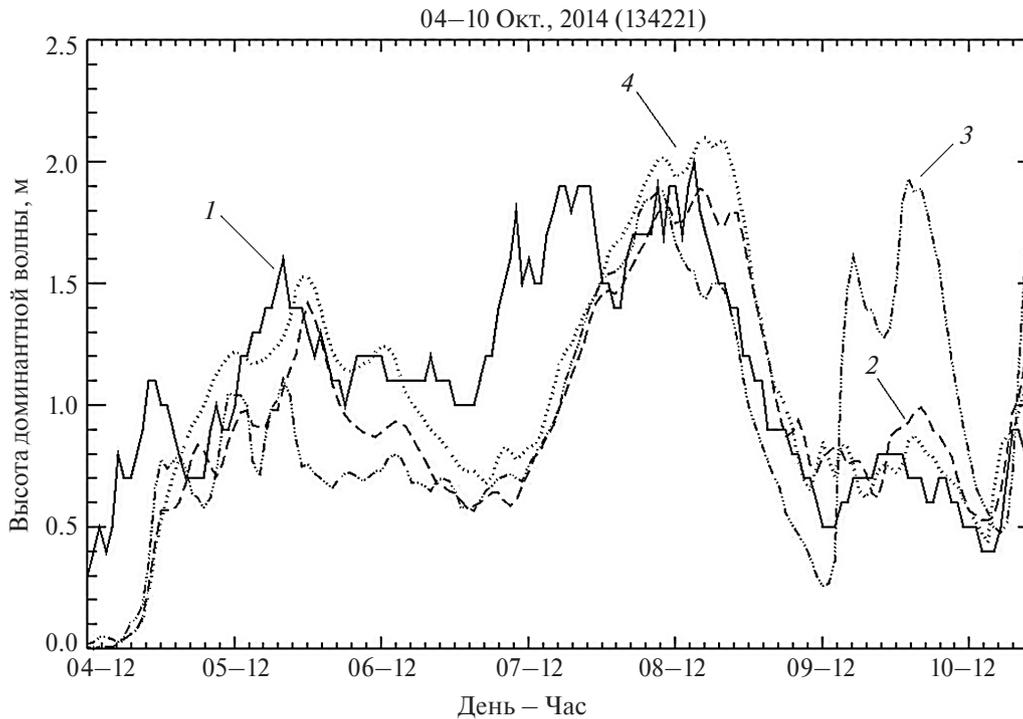


Рис. 6. Высота доминантной волны, построенная для буя в Финском заливе.

1 – фактические данные, 2 – данные модели (с MYJ), 3 – данные модели (параметризация ППС - TEMF), 4 – данные модели (схема MYNN-LEV.2.5).

Fig. 6. Significant wave height (m) in Gulf of Finland.

The measured data is shown with solid lines (1), the modeled results (PBL = MYJ) with dashed lines (2), the modeled results (PBL = TEMF) with dash-dot lines (3), the modeled results (PBL = MYNN-LEV.2.5) with black dots (4).

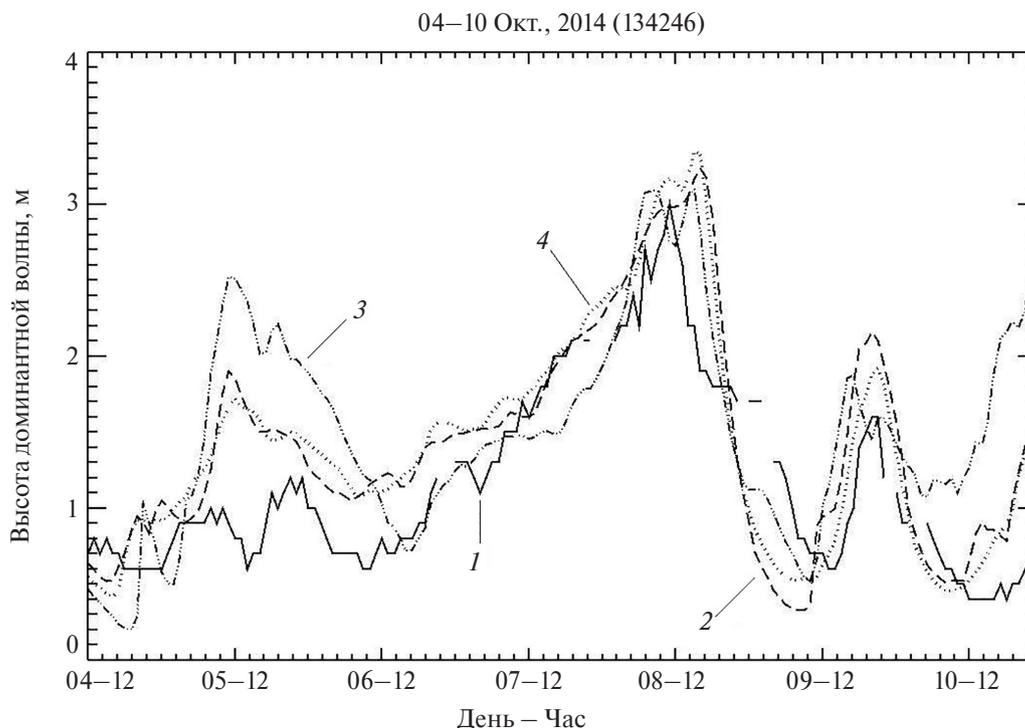


Рис. 7. Высота доминантной волны, построенная для буя в Ботническом заливе.

1 – фактические данные, 2 – данные модели (с MYJ), 3 – данные модели (параметризация ППС – TEMF), 4 – данные модели (схема ACM2).

Fig. 7. Significant wave height (m) in Bothnian Sea.

The measured data is shown with solid lines (1), the modeled results (PBL = MYJ) with dashed lines (2), the modeled results (PBL = TEMF) with dash-dot lines (3), the modeled results (PBL = ACM2) with black dots (4).

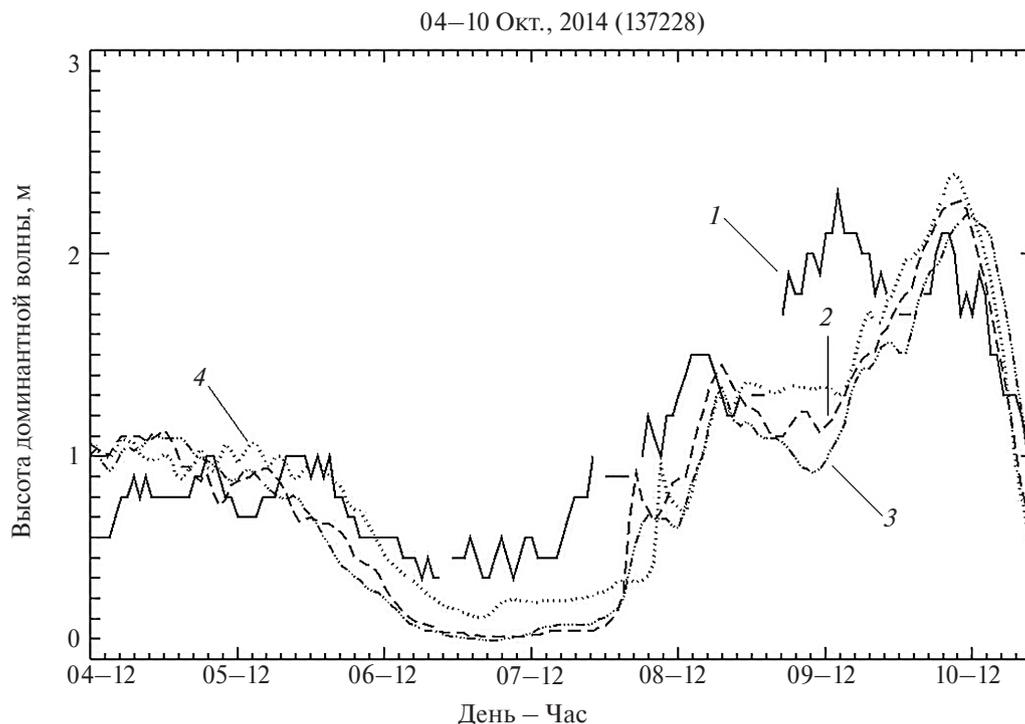


Рис. 8. Высота доминантной волны, построенная для буя на севере Ботнического залива.

1 – фактические данные, 2 – данные модели (с MYJ), 3 – данные модели (параметризация ППС – QNSE), 4 – данные модели (схема QNSE).

Fig. 8. Significant wave height (m) in Bay of Bothnia.

The measured data is shown with solid lines (1), the modeled results (PBL = MYJ) with dashed lines (2), the modeled results (PBL = QNSE) with dash-dot lines (3), the modeled results (PBL = QNSE) with black dots (4).

На севере Ботнического залива не было воспроизведено снижение высоты доминантной волны, которое наблюдалось до максимума. С утра 09.10 модель вновь показала значительное расхождение с наблюдением.

5. Заключение

Данный подход, основанный на сравнении высоты доминантной волны с несколькими экспериментами модели «атмосфера-морские волны» с различными схемами параметризаций пограничного слоя атмосферы, ранее не применялся. Используемая система WRF-WAVEWATCH III впервые рассмотрена для акватории Балтийского моря.

В этом подходе реализована связь между величинами, описывающими пограничный атмосферный слой (в особенности, коэффициента турбулентности и потоков тепла, влаги, импульса) и метеорологическими характеристиками (такие как температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра), которые влияют на высоту доминантной волны.

Наибольший интерес представляют крупные волны, возникающие в штормах. По этой причине было рассмотрено несколько штормов и из них было выбрано два, как наиболее показательных: август и октябрь 2014 г. Для прослеживания развития волнения эксперимент был начат за несколько дней до наступления штормовых условий. Суммарное количество дней для августа составляет 10 дней (для октября – на 7 дней).

Модельные значения сравнивались с данными буйковых наблюдений Финского Метеорологического Института, а именно с 4 автоматическими станциями, расположенными в центре Балтийского моря, в Финском заливе, в южной и северной части Ботнического залива. Таким образом, можно было исследовать эволюцию волнения на большой площади. Максимальная высота доминантной волны для различных участков изменялась от 2 до 4 (4.2 – для октября) м.

Основной характеристикой для оценки стала среднеквадратическая ошибка, рассчитанная между фактическими и модельными данными. Так, согласно полученным таблицам, наибольшая разница между СКО достигает 0.4 м. Это говорит о том, что модель атмосфера/океан чувствительна к выбору параметризации, описывающей пограничный слой. В целом значения ошибки варьируются от 0.3 до 0.7 (в обоих запусках это высота доминантной волны с параметризацией Total Energy–Mass Flux).

В случае шторма, произошедшего в августе 2014 г., предпочтительной оказалась схема Mellor–Yamada–Janjic, поэтому она была использована для октябрьского волнения. Получено, что вышеупомянутая параметризация вполне сопоставима с другими, имеющими меньшее отклонение от данных наблюдений. Из этого следует, что ее можно принять как основную при исследованиях в Балтийском море.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00124) (подготовка совместной модели атмосфера / морские волны) и в рамках государственного задания 0149-2019-0015 (выбор штормовых случаев, проведение серии экспериментов с совместной моделью, их анализ).

Литература

1. Heikkilä U., Sandvik A., Sorteberg A. Dynamical downscaling of ERA-40 in complex terrain using the WRF regional climate model // A. Clim. Dyn. 2011. V. 37. P. 1551–1564. DOI: 10.1007/s00382-010-0928-6
2. Chalikov D.V. Numerical simulation of the boundary layer above waves // Bound. Layer Met. 1986. V. 34. Issue 1–2. P. 63–98.
3. Chalikov D. The parameterization of the wave boundary layer // J. Phys. Oceanogr. 1995. V. 25. P. 1335–1349.
4. Chalikov D., Rainchik S. Coupled numerical modelling of wind and waves and the theory of the wave boundary layer // Boundary Layer Meteorol. 2010. V. 138. Issue 1. P. 1–41.
5. Чаликов Д.В., Булгаков К.Ю. Ветровые волны как элемент гидродинамической системы океан–атмосфера // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 3. С. 386–391.
6. 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 High Performance Computing In Meteorology, 25–29 October 2004, Reading U.K. Ed. George Mozdzynski.
7. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. Technical Report. NOAA/NWS/NCEP/MMAB. May 2009.

8. William C. Skamarock, Joseph B. Klemp, Jimy Dudhia et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 TECHNICAL NOTE. NCAR. June 2008.
9. Street I.S. Modeling the wave climate in the Baltic sea // Journal of Water Management and Research. 2014. V. 70. P. 19—29.
10. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO. 2000. P. 11—14. DOI: 10.5065/D6M043C6
11. Булгаков К.Ю., Стригунова Я.В. Схема расчета притока энергии от ветра к волнам для моделей прогноза ветровых волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 2. С. 1—5.
12. Soomere T., Behrens A., Tuomi L., Nielsen J.W. Wave conditions in the Baltic Proper and in the Gulf of Finland during windstorm Gudrun // Natural Hazards & Earth System Sci. 2008. V. 8, N 1. P. 37—46.
13. Arno Behrens, Heinz Gunther. Operational wave prediction of extreme storms in Northern Europe // Nat Hazards. 2009. V. 49. P. 387—399. DOI: 10.1007/s11069-008-9298-3
14. Jan-Victor Björkqvist, Laura Tuomi, Niko Tollman, Antti Kangas, Heidi Pettersson, Riikka Marjamaa, Hannu Jokinen, and Carl Fortelius. Brief communication: Characteristic properties of extreme wave events observed in the northern Baltic Proper, Baltic Sea // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2017. V. 17. P. 1653—1658. DOI: 10.5194/nhess-17-1653-2017
15. Xiao-Ming Hu., John W., Nielsen-Gammon, Fuqing Zhang. Evaluation of Three Planetary Boundary Layer Schemes in the WRF Model // J. Appl. Meteorol. Clim. 2010. V. 49. P. 1831—1844. DOI: 10.1175/2010JAMC2432.1
16. Hyeyum Hailey Shin, Song-You Hong. Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parametrizations in the WRF Model for a Single Day from CASES-99 // Boundary-Layer Meteorol. 2011. V. 139. P. 261—281. DOI: 10.1007/s10546-010-9583-z
17. Ariel E. Cohen., Steven M. Cavallo, Michael C. Coniglio and Harold E. Brooks. A Review of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes and Their Sensitivity in Simulating Southeastern U.S. Cold Season Severe Weather Environments // Weather Forecast. June 2015. V. 30. P. 591—612. DOI: 10.1175/WAF-D-14-00105
18. Honkola Maija-Liisa, Kukkurainen Nina, Saukkonen Lea, Petäjä Anu, Karasjärvi Janna, Riihisaari Tarja, Tervo Roope, Visa Mikko, Hyrkkänen Juhana, Ruuhela Reija. The Finnish Meteorological Institute: final report for the open data project. Finnish Meteorological Institute (Erik Palménin aukio 1), P.O. Box 503. December 2013. P. 38.

References

1. Heikkilä U., Sandvik A., Sorteberg A. Dynamical downscaling of ERA-40 in complex terrain using the WRF regional climate model. *A. Clim. Dyn.* 2011, 37, 1551—1564. DOI: 10.1007/s00382-010-0928-6
2. Chalikov D.V. Numerical simulation of the boundary layer above waves. *Bound. Layer Met.* 1986, 34, Issue 1—2, 63—98.
3. Chalikov D. The parameterization of the wave boundary layer. *J. Phys. Oceanogr.* 1995, 25, 1335—1349.
4. Chalikov D., Rainchik S. Coupled numerical modelling of wind and waves and the theory of the wave boundary layer. *Boundary Layer Meteorol.* 2010, 138, Issue 1, 1—41.
5. Chalikov D.V., Bulgakov K. Yu. Wind waves as an element of a hydrodynamic coupled ocean—atmosphere model. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2015, 51, 3, 344—348.
6. 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 High Performance Computing In Meteorology*, 25—29 October 2004, Reading U.K. Ed. George Mozdzynski.
7. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. Technical Report. NOAA/NWS/NCEP/MMAB. May 2009.
8. William C. Skamarock, Joseph B. Klemp, Jimy Dudhia et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 TECHNICAL NOTE. NCAR. June 2008.
9. Street I.S. Modeling the wave climate in the Baltic Sea. *Journal of Water Management and Research.* 2014, 70, 19—29.
10. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO. 2000. P. 11—14. DOI: 10.5065/D6M043C6
11. Bulgakov K. Yu., Strigunova Y.V. Wind input scheme for wave forecast model. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika.* 2017, 10, 2, 1—5 (in Russian).
12. Soomere T., Behrens A., Tuomi L., Nielsen J.W. Wave conditions in the Baltic Proper and in the Gulf of Finland during windstorm Gudrun. *Natural Hazards & Earth System Sci.* 2008, 8, N 1, 37—46.

13. Arno Behrens, Heinz Gunther. Operational wave prediction of extreme storms in Northern Europe. *Nat Hazards*. 2009, 49, 387—399. DOI: 10.1007/s11069-008-9298-3
14. Jan-Victor Björkqvist, Laura Tuomi, Niko Tollman, Antti Kangas, Heidi Pettersson, Riikka Marjamaa, Hannu Jokinen, and Carl Fortelius. Brief communication: Characteristic properties of extreme wave events observed in the northern Baltic Proper, Baltic Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2017, 17, 1653—1658. DOI: 10.5194/nhess-17-1653-2017
15. Xiao-Ming Hu, John W. Nielsen-Gammon, Fuqing Zhang. Evaluation of Three Planetary Boundary Layer Schemes in the WRF Model. *J. Appl. Meteorol. Clim.* 2010, 49, 1831—1844. DOI: 10.1175/2010JAMC2432.1
16. Hyeyum Hailey Shin, Song-You Hong. Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parametrizations in the WRF Model for a Single Day from CASES-99. *Boundary-Layer Meteorol.* 2011, 139, 261—281. DOI: 10.1007/s10546-010-9583-z
17. Ariel E. Cohen, Steven M. Cavallo, Michael C. Coniglio and Harold E. Brooks. A Review of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes and Their Sensitivity in Simulating Southeastern U.S. Cold Season Severe Weather Environments. *Weather Forecast.* June 2015, 30, 591—612. DOI: 10.1175/WAF-D-14-00105
18. Honkola Maija-Liisa, Kukkurainen Nina, Saukkonen Lea, Petäjä Anu, Karasjärvi Janna, Riihisaari Tarja, Tervo Roope, Visa Mikko, Hyrkkänen Juhana, Ruuhela Reija. The Finnish Meteorological Institute: final report for the open data project. *Finnish Meteorological Institute* (Erik Palménin aukio 1), P.O. Box 503. December 2013. P. 38.