

АНАЛИЗ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЦЕМЕССКОЙ БУХТЕ ЧЕРНОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ SWAN

С.А. Мысленков^{1,2}, В.С. Архипкин²

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

Введение

В последние годы благодаря активному хозяйственному освоению все более возрастает экономический и научный интерес к открытым и прибрежным районам морей России. Это связано в основном с большими перспективами освоения и добычи нефти и газа на шельфе, с одной стороны, и необходимостью минимизации экологических рисков при развитии регион, с другой. В настоящее время ведется развитие новых портовых зон в районе Тамани и Новороссийска, ведутся масштабные научные исследования для подготовки лицензионных нефтегазовых участков к началу разведки и освоению, идет прокладка газопровода «Южный поток». При этом Черноморское побережье было и остается основной курортной зоной России, поток отдыхающих с каждым годом увеличивается, антропогенная нагрузка возрастает.

При планировании развития подобных прибрежных регионов большую роль играет качественная гидрометеорологическая информация о районе, которая необходима как для проектирования различных гидротехнических сооружений и морских работ, так и для экологического мониторинга и прогнозов состояния морской и прибрежной экосистем [4]. Одним из наиболее важных разделов гидрометеорологической информации для указанных отраслей народного хозяйства являются волновые условия. В исследованиях экологической направленности параметры волнения применяются для прогноза разрушения берегов, переотложения песчаных наносов и др. Для Черного моря – это известная проблема эрозии Анапской пересыпи [6], которая зависит от подъема уровня моря, волнового режима, прибрежных течений, а также новое направление – строительство искусственных пляжей, островов [7]. Знание волнового режима также важно для расчета коэффициентов турбулентного обмена на границе океан-атмосфера [17], от величины которых зависит правильность расчета дрейфовых течений и, в конечном итоге, расчет переноса примесей в верхнем слое океана.

В настоящее время наиболее эффективным способом для выполнения любых расчетов, реанализа и прогноза, связанных с параметрами волнения, является численное моделирование волнения с усвоением инструментальных наблюдений волнения и калибровкой численных моделей по ним. Наиболее популярными являются ветро-волновые модели третьего поколения WAM, SWAN, WaveWatch [19] и др.

Для исследования волнового климата и прогнозирования волнения в Черном море существует несколько вариантов использования современных ветро-волновых моделей [1, 3, 8—10, 16, 18]. Однако они в первую очередь ориентированы на описание волнения в открытой части моря, и при этом редко производится калибровка и верификация моделей по прибрежным экспериментальным данным. Это объясняется практически полным отсутствием инструментальных данных измерения волнения у российского побережья; исключение составляют данные закоренных волновых буюв, полученные в 1995—1996 гг. [1, 12, 16, 18].

В настоящей работе описываются результаты использования волновой модели для регионального диагноза ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря в Цемесской бухте. Для моделирования волнения применялась спектральная волновая модель SWAN с использованием нерегулярной вычислительной сетки. Результаты получены сотрудниками Гидрометцентра России и Лаборатории оценки природных рисков (географический факультет МГУ).

Описание модели и входных данных

Для решения поставленной задачи была выбрана спектральная волновая модель третьего поколения SWAN версии 40.81, так как она была создана специально для расчетов параметров ветрового волнения в прибрежной зоне по заданным полям ветра и течений, а также рельефу дна [20]. SWAN разрабатывает и свободно распространяет Дельфийский университет технологии. В то же время, как показывает сравнение результатов численных расчетов, выполненных по этой модели, с результатами расчетов по другим моделям (WAM и WATCH III), модель SWAN не уступает по качеству расчетов и в открытом море [19]. Данная модель уже использовалась для моделирования волнения в Черном море; Были получены хорошие результаты при сравнении с данными наблюдений на глубокой воде: отклонение по значительной высоты волны составило около -0.2,-0.3 м, при этом модель в основном занижала пиковые значения [12, 19].

Среди отечественных работ, посвященных моделированию волнения в Черном море, можно отметить работу [8], где модель SWAN использовалась для составления морского

регистра, и работу [16], где SWAN успешно воспроизводит шторм в Черном море в ноябре 2007 года. Также модель SWAN применялась для сравнения с радиолокационными наблюдениями и при исследовании волнения во время Новороссийской боры [5, 11, 21].

В настоящий момент в Гидрометцентре России производится прогноз волнения в Черном море при помощи модели WW3 [10]. Модель имеет шаг по пространству и работает на входных данных GFS. Проверка качества модели осуществлялась на основе спутниковых данных, и результаты испытаний были признаны удовлетворительными.

В SWAN реализованы следующие процессы, связанные с распространением волн: распространение волн в пространстве, рефракция и дифракция волн, генерация ветром, диссипация из-за "забурунивания" (whitecapping), диссипация из-за обрушения волн, вызванного изменением глубины; диссипация при трении о дно, нелинейного взаимодействия волн друг с другом как в глубоком море (quadruplets), так и в мелком (triads)[20].

В данной работе в качестве входных данных о ветре для диагностических расчетов использовались данные реанализа высокого разрешения NCEP Climate Forecast System Reanalysis (1979—2010 гг.) [14]. Пространственное разрешение реанализа составляет $\sim 0.3^\circ$. Данные NCEP были выбраны по двум причинам: во-первых, они обладают лучшим пространственным и временным разрешением по сравнению с такими реанализами, как MERRA, JRA, Era-Interim, во-вторых, сравнение данных о скорости и направлении ветра реанализа с данными метеостанции в р-не Новороссийска показало, что данные реанализа хорошо согласуются с наблюдениями, ошибка по скорости ветра в период действия штормовых ветров не превышает 2–3 м/с.

Для калибровки волновой модели SWAN были использованы данные лазерного уровнемера Riegl LD90-3200HiP, установленного в Цемесской бухте на конце нефтеналивного терминала нефтепорта «Шесхарис» (см. врезку на рис. 1). Данные предоставил А. Пономарев (Гидрометеобюро Новороссийска). Глубина моря в точке измерений составляет 22 м. Частота измерений составляет 3 Гц, а заявленная точность измерения волнения – 2 см. Данные по значительной высоте волны имеют временную дискретность 15 мин, длина имеющегося ряда – с 1 января по 31 декабря 2010 года.

При реализации ветро-волновых моделей существует значительный произвол в выборе и подгонке нескольких калибровочных коэффициентов. Причина такой ситуации заключается в несовершенстве физического описания диссипации волновой энергии, донного трения и др. [13]. Поэтому калибровочные коэффициенты подбираются на основе сравнения с инструментальными и другими экспериментальными данными и могут

изменяться в широком диапазоне. Поскольку в нашем случае калибровка модели производилась только по данным измерений в Цемесской бухте, то качество моделирования в открытом море не оценивалось. Оценку успешности моделирования для открытого моря можно найти в [12, 19].

В качестве расчетной сетки использовалась нерегулярная триангуляционная сетка, включающая в себя все Черное море с шагом по пространству 10 км и Цемесскую бухту с шагом до 200 м (рис. 1.). Общее количество узлов сетки – 8443.

На представленной нерегулярной сетке большая часть моря идеализированно считается морем бесконечной глубины с шагом сетки 10 км. На подходах к Цемесской бухте шаг сетки уменьшается пропорционально уменьшению глубины и составляет около 200-300 м в районе расположения лазерного волнографа. Такой подход позволяет проследить развитие ветрового волнения как в открытом море, так и при выходе волн на мелководье, где действуют процессы рефракции, дифракции, обрушения, диссипации. Использование нерегулярной сетки позволяет получать характеристики волнения даже в гаванях и небольших бухтах с подробным разрешением по пространству, но в отличие от расчетов на прямоугольных сетках число узлов получается на несколько порядков меньше, что позволяет производить вычисления на персональных компьютерах [15, 22].

Результаты

После произведенных при помощи модели SWAN расчетов был получен ряд выходных модельных данных с временным шагом 15 мин в точке, соответствующей положению лазерного волнографа, за период времени с 1 января по 31 декабря 2010 года. Выходные данные о параметрах ветровых волн в узлах сетки по пространству были получены с временным интервалом 3 часа. На рис. 2. приведен пример распространения волн в Цемесской бухте по данным моделирования за 5 марта 2010 года. Как видно из рисунка, в районе, где выполнялись инструментальные измерения, волны существенно трансформируются, по сравнению с открытым морем.

Далее было произведено сравнение данных моделирования с данными волномера на пирсе Шесхарис за 2010 год; на рис. 3 приведены фрагменты сравнения за январь, февраль и декабрь 2010 года. Результаты сравнения за другие месяцы не приводятся, поскольку в эти периоды высота значительных волн в основном не превышает 1 м. В летние месяцы наблюдаются волны высотой 0,6–0,8 м, которые вызваны бризовым ветром. Точность реанализа недостаточна для воспроизведения бризовой циркуляции, поэтому во время бриза SWAN систематически занижает волнение на 0,4–0,5 м.

Из графиков на рис.3 можно видеть, что модель довольно точно воспроизводит как фазу наступления максимального волнения, так и абсолютные высоты. Наибольшее отличие расчетов от наблюдений наблюдается при очень быстром и резком увеличении высоты волны, что может объясняться слишком большим временным шагом входных данных по ветру (1 час), в результате чего модель не может воспроизводить более высокочастотные процессы. По данным волнографа 23 и 26 января наблюдались волны выше 2 м, однако модель практически на это не отреагировала, что связано в проявлением Новороссийской боры (наблюдался ветер северо-восточного направления более 20 м/с). Данные реанализа ветра не воспроизводят такие явления, как бора, поэтому волновые модели в этих ситуациях не дают удовлетворительных результатов.

Статистический анализ всего ряда данных по значительной высоте волн (около 55000 значений) показал, что систематическая ошибка модели составляет -0,12 м (значение отрицательное, т.е. модель занижает высоту волн), среднеквадратическое отклонение – 0,31 м, коэффициент корреляции – 0,75. Однако, как было отмечено ранее, в летние месяцы при слабом ветре или во время действия бризов модель некорректно воспроизводит волнение, что может занижать итоговые оценки. Минимальная корреляция расчетных и наблюдаемых высот волн наблюдается в июне (0,1), а максимальная – в ноябре (0,86). При штормах, когда высота волн может превышать 3 м, модель, как правило, занижает высоту волн. Систематическая ошибка для значительных волн выше 3 м (выборка по всему периоду) составляет -0,6 м.

Сравнение результатов расчета периода волн не производилось, так как инструментальные данные о периоде волн отсутствуют. По модели средний период волн за весь год составляет 2 с; во время штормов с высотами волн более 3 м период увеличивается до 4–5 с, а 14 февраля 2010 года наблюдались волны с периодом 6 с.

Таким образом были рассчитаны статистические показатели качества модели для периодов с 1 января по 11 апреля и с 8 октября по 31 декабря 2010 года. Систематическая ошибка составила -0,03 м, среднеквадратическая ошибка – 0,11 м, коэффициент корреляции – 0,76.

Заключение

Спектральная волновая модель SWAN была адаптирована для регионального диагноза волнения в Цемесской бухте Черного моря. Расчеты производились с использованием оригинальной неструктурной сетки, что позволило получить модельные параметры ветрового волнения с шагом по пространству 200–300 м. При сравнении данных

моделирования по значительной высоте волн с измерениями были получены статистические показатели качества модели, которые являются вполне удовлетворительными для современных волновых моделей. Модель хорошо воспроизводит как фазу наступления максимального волнения, так и абсолютные высоты, однако в ряде случаев при штормах с высотой волн более 3 м модель занижает высоту волны. В настоящее время ведется работа по созданию системы регионального прогноза волнения в Черном море на основе модели SWAN и прогностических полей ветра GFS.

Список использованных источников

1. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Шторм на черном море 11 ноября 2007 г. и статистики экстремальных штормов моря // Известия РГО. – 2009. – Т. 141. – Вып. 2. – С. 71–80.
2. Дьяков Н.Н., Фомин В.В., Мартынов Е.В., Гармашов А.В. Ветро-волновой режим Азовского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Вып. № 22. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – С. 228–239.
3. Ефимов В.В., Белокопытов В.Н., Комаровская О.И. Численное моделирование ветрового волнения в северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 6. – С. 36–43.
4. Есин Н.В., Куклев С.Б., Крыленко В.В., Якубенко В.Г., Часовников В.К. Некоторые характеристики гидрофизических и литодинамических процессов, необходимые для разработки нормативов допустимых воздействий на морскую среду Черного моря // Водное хозяйство России: проблемы, технология, управление. – 2008. – № 5. – С. 49–71.
5. Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Чернышов П.В., Архипкин В.С., Телегин В.А., Куклев С.Б., Чернышова А.Ю., Пономарев А.И., Халиков З.А. Система мониторинга ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря на основе радиолокации, прямых наблюдений и моделирования: первые результаты // Проблемы региональной экологии. – 2013. – № 4. – С. 172–183.
6. Косьян, Р.Д., Крыленко В.В., Куклев С.Б. Хрупкое равновесие Анапской пересыпи // Природа. – 2012. – Т. 2. – С. 19–28.
7. Косьян Р.Д., Крыленко В.В., Крыленко М.В. Особенности современного морфологического строения южной части Анапской пересыпи // Геоморфология. – 2012. – № 4. – С. 73–80.
8. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Иванов С.В., Чернышова Е.С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей // Российский морской регистр судоходства. – СПб, 2006. – 452 с.
9. Матушевский Г.В., Кабатченко И.М. Объединенная параметрическая интегральная модель ветрового волнения и ее применение // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 5. – С. 45–50.
10. Струков, Б.С., Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытаний для акваторий Азовского, Черного и

Каспийского морей // Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний. – 2013. – 192 с.

11. *Toropov P.A., Myslenkov S.A., Samsonov T.E.* Численное моделирование Новороссийской боры и связанного с ней опасного ветрового волнения // Вестник МГУ. Серия Географическая. – 2013. – № 2. – С. 38–46.

12. *Akpınara A., Vledderb G., Kömürçüd M., Özgere M.* Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea Continental Shelf Research Volumes 50–51, 15 December 2012, Pages 80–99.

13. *Cavaleri, L., J.-H.G.M. Alves, F. Ardhuin, et al.* Wave modelling – The state of the art // Progress in Oceanography. – 2007. – Vol. 75. – P. 603–674.

14. *CISL Research Data Archive.* <http://rda.ucar.edu>

15. *Dietrich J.C., Tanaka S., Westerink J.J., Dawson C.N., Luettich Jr.R.A., Zijlema M., Holthuijsen L.H., Smith J.M., Westerink L.G., Westerink H.J.* Performance of the Unstructured-Mesh, SWAN+ADCIRC Model in Computing Hurricane Waves and Surge // J. Scien. Comp. – August 2012. – Vol. 52, № 2. – P. 468-497.

16. *Divinsky B.V., Levin B.V., Lopatukhin L.I., Pelinovsky E.N., Slyunyaev, A.V.* A freak wave in the Black Sea: observations and simulation // Doklady Earth Sciences – 2004. – 395A. – P. 438–443.

17. *Kudryavtsev V.N, Dulov V, Shrira V, Malinovsky V.* On vertical structure of wind-driven sea surface currents // J. Phys. Oceanogr. – 2008. – Vol. 38. – P: 2121–2144 .

18. *Rusu E., Rusu L., Guedes Soares C.* Prediction of extreme wave conditions in the Black Sea with numerical models, JCOMM Technical Report No. 34 / WMO-TD. . – 2006. – No. 1368.

19. *Rusu E.* Strategies in using numerical wave models in ocean/coastal applications // Journal of Marine Science and Technology. – 2011. – V. 19. – P. 58–75.

20. *SWAN Technical Documentation, SWAN Cycle III version 40.51A.* – Netherlands. Delft: University of Technology, 2007. – 98 p.

21. *Toropov P.A., Myslenkov S.A., Shestakova A.A.* Numerical simulation of Novorossiysk bora and related wind waves using the WRF-ARW and SWAN models // Russ. J. Earth Sci. – 2012. – V. 12. – ES6001. doi:10.2205/2012ES000524.

22. *Zijlema, M.* Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids // Coast. Eng. – 2010. – Vol. 57. – P. 267–277.

Поступила в редакцию 25.10.2013 г.

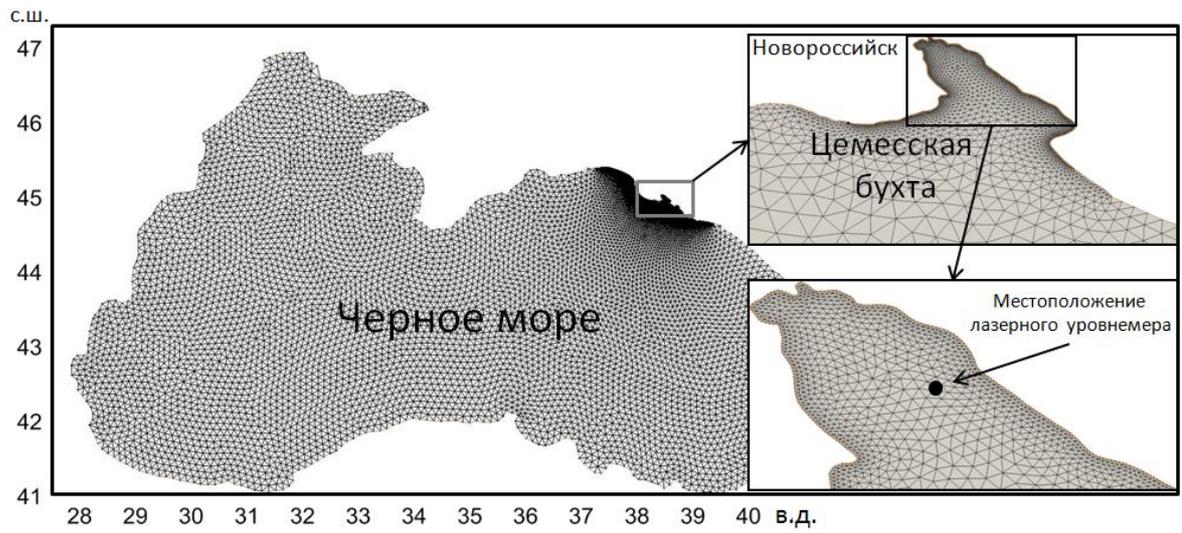


Рис. 1. Расчетная неструктурная сетка для Черного моря. На врезке - Цемесская бухта. Черным кружком обозначено положение лазерного волнографа.

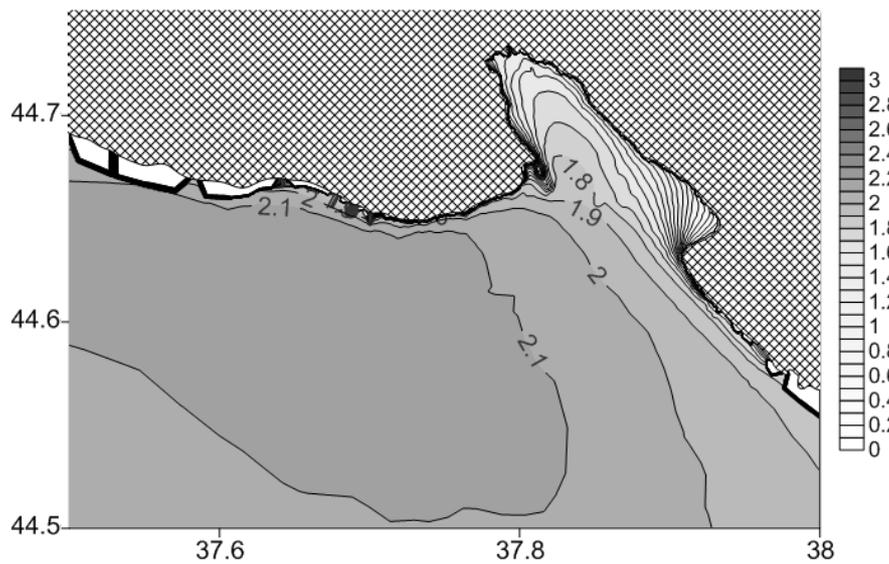


Рис. 2. Значительная высота волн (м) в Цемесской бухте 5 марта 2010 года.

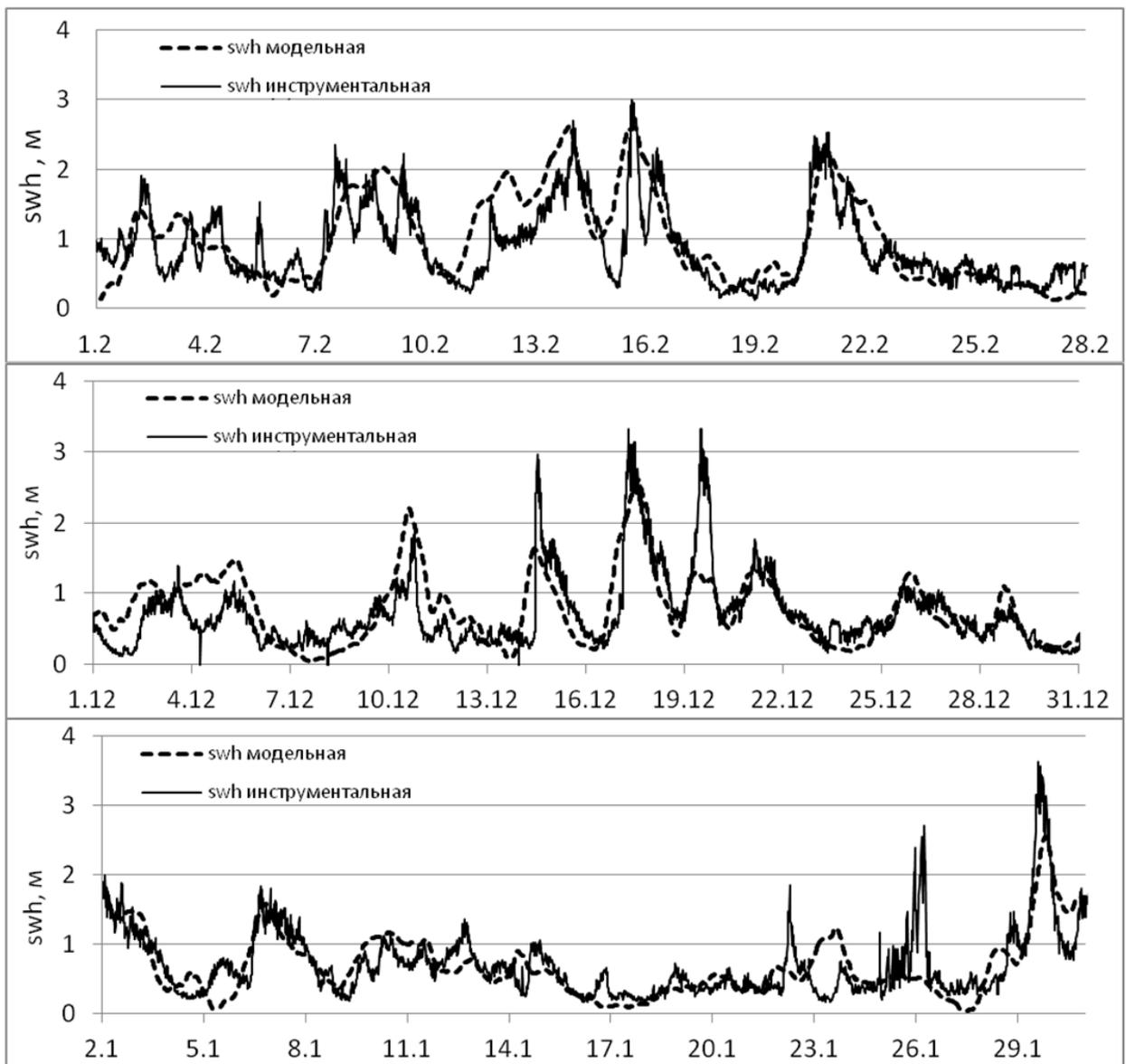


Рис. 3. Сравнение высоты значительных волн (swh) по модели SWAN и лазерному волнографу (Цемесская бухта) за январь, февраль и декабрь 2010 года.