

# НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАВОЛНОЛОМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ИСКУССТВЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Куклев С.Б., Дивинский Б.В.

*Южное отделение учреждения Российской Академии наук*

*Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН,*

[kuklev@ecologpro.ru](mailto:kuklev@ecologpro.ru), [divin@ecologpro.ru](mailto:divin@ecologpro.ru)

На примере объекта «Остров Федерация» приведены некоторые результаты исследования гидродинамического режима в заволноломном пространстве искусственных территорий. Сделана оценка и даны рекомендации применимости различных волновых и гидродинамических моделей для решения поставленных задач.

By the example of “Federation Island” some research data of hydrodynamic regime in water area of artificial territories protected by breakwaters are presented. Evaluation and recommendations of different wave and hydrodynamic models validity for problems solution are given.

## **1. Постановка задачи.**

### **1.1. Задачи исследования.**

Исследование динамики вод акваторий с ограниченным водообменом и сложной конфигурацией требует особого внимания на всех этапах построения, верификации и проведения численных экспериментов.

Исследование гидродинамического режима подобных объектов предполагает:

- определение волноопасных направлений;
- получение режимных характеристик ветра и волн для условий глубокой воды;
- расчет трансформации волнового поля на мелководье;
- расчет параметров волн и течений на защищенной акватории;
- решение специальных задач, к которым относятся, например, расчет наката волн на волнозащитные сооружения, анализ возможностей проявления опасных явлений (тягун, толчея), заносимость акватории и динамика пляжей, экологические аспекты (застойные явления, эвтрофикация вод).

### **1.2. Объект исследования.**

В работе представлены результаты исследований, выполненные в рамках ТЭО проекта «Остров Федерация. Строительство гидротехнических сооружений». Объект расположен в Хостинском районе г. Сочи (м. Видный) северокавказского побережья Черного моря (рис. 1). Уникальность объекта связана с архитектурными решениями, масштабами создания искусственных территорий (~ 270 га только тела самого острова), масштабами научных исследований (выполнено моделирование более 20 вариантов гидротехнических решений).

Основной задачей математического моделирования гидродинамических процессов проекта было оптимизация расположения, параметров волноломов, малых островов, каналов Острова, пляжей, которая отвечала бы требованиям экономической целесообразности с одной стороны и экологической

безопасности с другой. В рамках настоящей работы рассматриваются вопросы выбора методов решения поставленных задач.



Рис. 1. Ситуационный план острова «Федерация».

### ***1.3. Методы исследования.***

В прибрежной зоне для моделирования трансформации волнового поля используется фазоусредненная спектральная модель SWAN (Simulating WAves Nearshore) [5]. В модели SWAN реализованы различные схемы генерации волнения, рефракция волновых лучей в поле переменной батиметрии и течений, дифракция (ограничено), блокирование и отражение на встречном течении, учет препятствий, диссипация волновой энергии с учетом различных механизмов, эффекты забурунивания волн, трех- и четырехволновые взаимодействия.

Несмотря на то, что модель SWAN постоянно развивается как с физической стороны, так и с точки зрения численных алгоритмов, она не обеспечивает корректных расчетов на мелкой воде, где значительна роль нелинейных эффектов, связанных, в частности, с обрушением волн. Некорректность расчетов модели SWAN в случае сложной конфигурации берега, наличия различных препятствий (заволноломного пространства искусственных территорий, портов, яхтовых стоянок и пр.), очевидна даже при визуальном анализе полученных результатов.

Для исследования волнового режима на защищенной акватории объекта «Остров Федерация» применялась модель CGWAVE [6], основанная на т.н. уравнении «комбинированной рефракции-дифракции», впервые предложенном Эккартом [8] в 1952 г. В настоящее время CGWAVE является общепризнанным методом оценки прибрежного волнового режима, которое может использоваться при решении широкого круга задач. Она применима для оценки волновых полей в портах, заливах, открытых прибрежных районах, бухтах, береговых проливах, вокруг островов и вокруг плавучих стационарных сооружений. Помимо эффектов волновой рефракции-дифракции модель CGWAVE учитывает эффекты рассеяния волн в результате донного, бокового трения, разрушения волн, нелинейной амплитудной дисперсии и потерь волновой энергии при входе в гавань и заволноломные пространства. Численная реализация модели CGWAVE основана на методе конечных элементов.

Детальное исследование волновых процессов в прибрежной области проводилось с использованием современной волновой модели, основанной на численном решении уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска, представленных в двухмерном и одномерном видах. В данной модели учитываются: переменная глубина, рефракция волн, дифракция волн, обрушение волн, донное трение, изменение профиля береговой линии, частичное отражение, нелинейные волновые взаимодействия, трансформации спектральных составляющих.

Режим течений исследовался с помощью программного комплекса MIKE-21, разработанного в Датском Гидравлическом институте. Гидродинамический модуль комплекса, основанный на численном решении уравнений Навье-Стокса с использованием турбулентной схемы замыкания, позволяет учитывать следующие эффекты: стратификацию вод, турбулентную диффузию, бароклинности, ветрового напряжения, донного трения и др.

#### 1.4. Схема численных экспериментов.

Первоначально проектом предусматривалось вынесение защитных сооружений до глубин порядка 30 м. Не касаясь обоснованности подобных проектных решений (сам проект разрабатывался сторонней организацией), остановимся на особенностях постановки задачи и численной реализации моделей.

На рис. 2. представлена карта глубин района предполагаемого строительства.

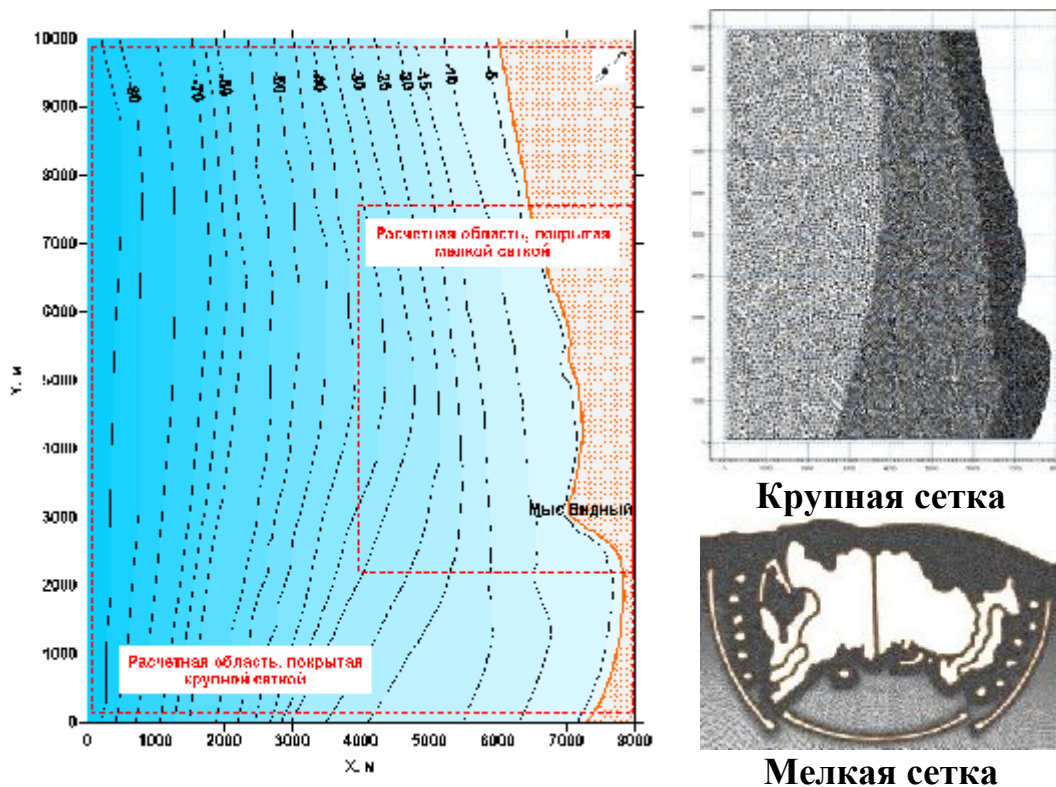


Рис. 2. Исходная батиметрия и расчетные области.

Волновой режим глубоководной части района исследований моделировался с помощью волновой модели SWAN (расчетная область, покрытая укрупненной сеткой). Полученные параметры волн служили в качестве граничных условий для моделей CGWAVE и Буссинеска. Детализация расчетов в при-

брежной части, а также в заволноломном пространстве острова выполнялась на мелкомасштабной сетке с ее сгущением около препятствий.

Расчеты течений производились как по двумерной (осреднение по глубине), так и трехмерной гидродинамическим моделям. Использование трехмерной гидродинамической модели диктуется необходимостью корректного описания поля течений при наличии большого числа проливов, небольших островов, а также в условиях сложной проектной батиметрии. Углы откоса каждого отдельного острова и основного тела острова определяются, исходя из материалов отсыпки, гидродинамического воздействия и рекреационного назначения. Горизонтальная расчетная сетка (рис. 3) состояла из 22000 расчетных узлов. В вертикальной плоскости (рис. 4) расчетная область делилась на пять секций с выделением поверхностного и придонного слоев.

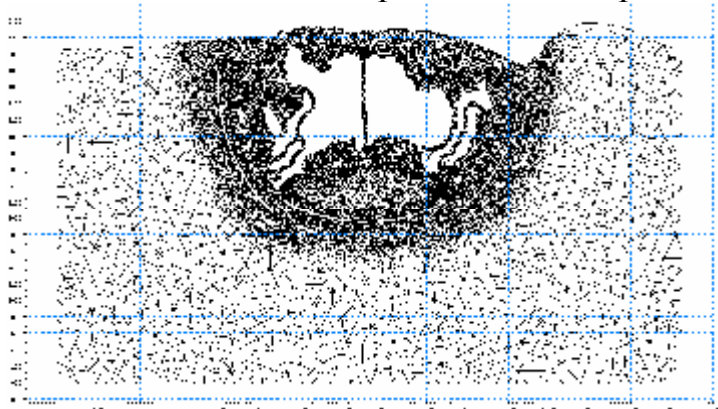


Рис. 3. Горизонтальная расчетная сетка для 2D и 3D моделей.

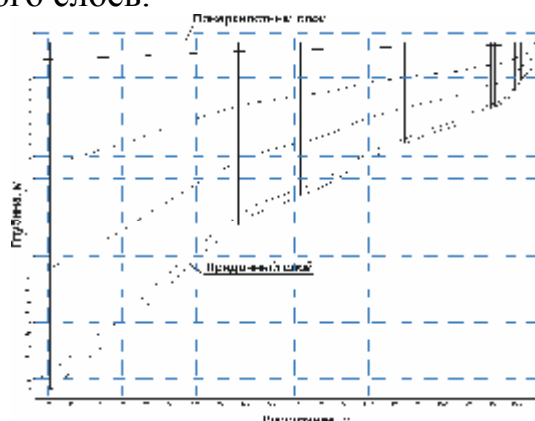


Рис. 4. Вертикальная расчетная сетка для 3D модели.

На рис. 5 схематично приведена процедура гидродинамических расчетов.



Рис. 5. Схема численных расчетов.

Волновой и гидродинамический модули могут выполняться в рамках одной объединенной модели, однако подобные вычисления крайне ресурсоемки.

## 2. Обсуждение результатов.

Изложенный выше подход позволяет решать широкий спектр задач, задаваемый практикой гидротехнического строительства. В их числе расчет параметров ветровых волн (высот, периодов, длин волн) в заданных точках защитных сооружений и в заволноломном пространстве, анализ режима течений на защищенной акватории с определением зон недостаточной промываемости или, наоборот, интенсивного размыва и др.

### 2.1. Расчет ветрового волнения.

Закономерности трансформации поля ветрового волнения при распространении волн с глубокой воды на мелкую исследовались для трех волноопасных направлений (Ю, ЮЗ, З) и при исходных параметрах волн разной обеспеченности.

На рис. 6 приведен пример расчета волнового поля для высот волн 1% обеспеченности в штормах повторяемостью 1 раз в 50 лет. Расчет произведен по модели SWAN. Стоит отметить вопросы верификации модели. Практически полное отсутствие каких-либо длительных мониторинговых наблюдений за ветровым волнением в рассматриваемом регионе вынуждают обратиться к вопросам подобия процессов. Ранее модель SWAN была верифицирована для района Геленджика [7]. Для этого использовались данные продолжительного волноизмерительного эксперимента [2], проведенного на базе Южного отделения Института океанологии РАН в 1996-2003 гг. С точки зрения типизации ветро-волнового режима Черного моря побережья Геленджика и Сочи относятся к одному району независимо от подходов к районированию моря, изложенных в существующих пособиях по гидрометеорологии Черного моря [1, 3, 4]. Таким образом, при известных допущениях модель, верифицированная для одного участка побережья, может служить в качестве оценочной модели для другого участка в пределах одного динамического района.

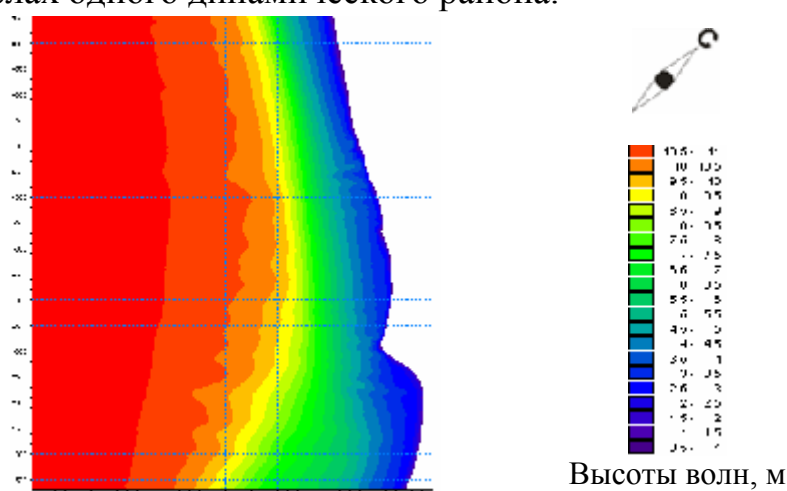


Рис. 6. Юго-западное волнение. Высоты волн 1% обеспеченности для штормов повторяемостью 1 раз в 50 лет

Отметим, что модель SWAN не может разрешать фазу волны. Такое важное волновое явление, как волновая дифракция, реализовано аппроксимативно. Это накладывает ограничения на применимость модели в присутствии большо-

го числа отдельных островов и волноломов. Как следует из рис. 7, модель практически не работает в тыловой части основного острова и пересекающих его каналах.

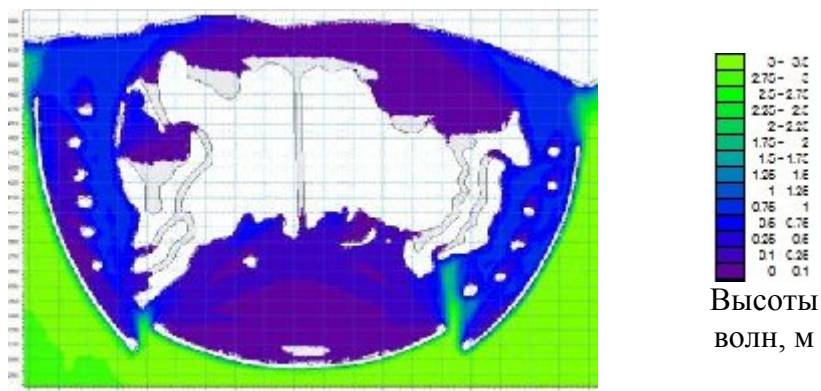


Рис. 7. Пример расчета по модели SWAN максимальной высоты волны в заволноломном пространстве.

В отличие от SWAN модель CGWAVE является фазоразрешающей и хорошо подходит для расчета параметров волн в сложных батиметрических условиях. Необходимо отметить, что численная реализация модели CGWAVE предъявляет повышенные требования к вычислительным возможностям компьютера. Пространственная сетка должна быть построена с таким расчетом, чтобы на характерную длину волны приходилось порядка десяти расчетных точек. Рис. 8 дает представление о закономерностях распространения волн на защищенной волноломами акватории.



Рис. 8. Пример расчета распространения волн на защищенной акватории. Модель CGWAVE.

Важным моментом гидротехнического проектирования является выбор приемлемого варианта компоновки защитных сооружений, исходя из функциональных, экономических и эстетических соображений.

На рис. 9 представлен этап проработки волнолома. Требуется подобрать оптимальные геометрические параметры защитного сооружения при высотах подходящих волн заданной обеспеченности.

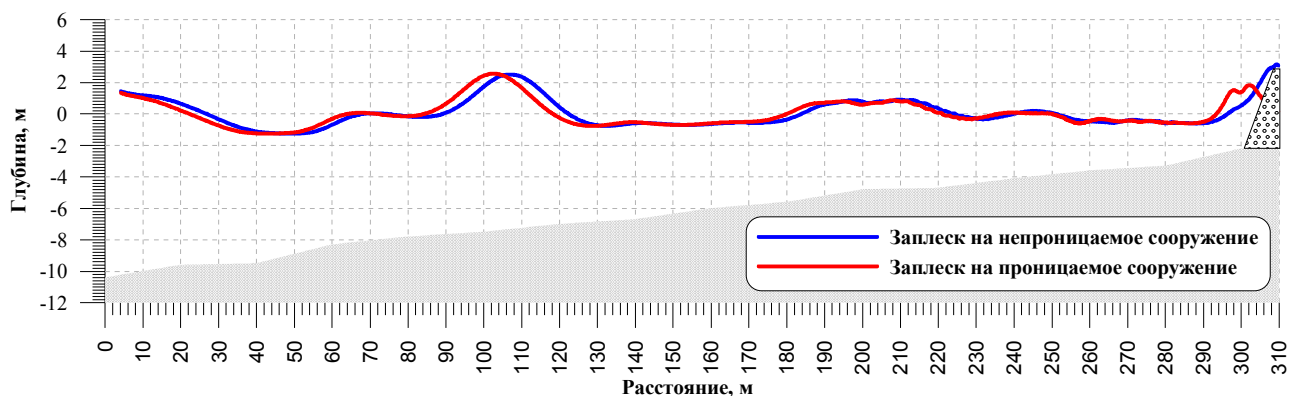


Рис. 9. Пример заплеска нерегулярной волны на защитное сооружение

Для решения подобной задачи применяется одномерная волновая модель, основанная на численном решении уравнений Буссинеска. Модель позволяет реализовывать воздействие различных типов подходящих волн (регулярных, нерегулярных, с заданной формой спектра), а также учитывать свойства подстилающей поверхности и отражающие возможности волнолома. Из рис. 9, в частности, следует, что использование непроницаемого для волн защитного сооружения приведет к возможному переливу вод через препятствие.

Модель Буссинеска, реализованная в двумерном виде (рис. 10), позволяет оценивать резонансные свойства ограниченных акваторий. К примеру, в промежутках между основными волноломами, окружающими остров, может развиться толчая, сильно ухудшающая навигационные возможности акватории. Толчая – проявление стоячих волн; характеризуется существенно трехмерным ослабленным волнением. На мгновенных картах пространственного распределения высот взволнованной поверхности толчая проявляется в виде характерной мозаики, чередования гребней и ложбин. Частотный спектр толчеи отличается отсутствием выраженных пиков спектральной плотности.

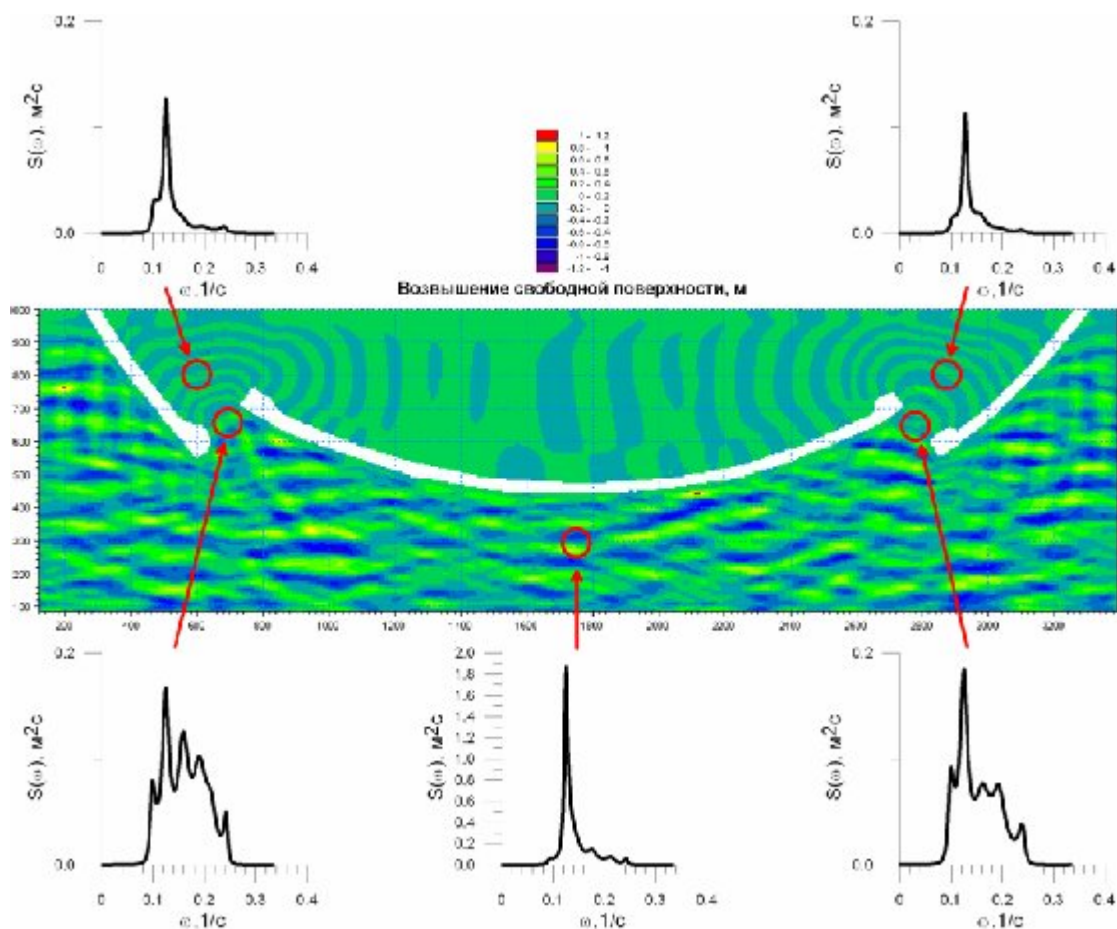


Рис. 10. Трансформация спектров возвышений свободной поверхности при проникновении волн за огражденную акваторию. Исходные параметры: угол подхода – 0 градусов, высота – 1 м, период – 8 с.

Как показывают исследования, при данном варианте компоновки волноломов толчея может образовываться как в северном, так и в южном проходах между волноломами, в зависимости от угла подхода волн. Наиболее заметно толчея проявляется при волнении в 1-2 метра и периодах 7-8 секунд.

## 2.2. Расчет течений.

Расчеты выполнялись по трехмерной гидродинамической модели течений (3D модель) и двухмерной гидродинамической модели (2D модель).

Верификация моделей осуществлялась по данным прямых натурных измерений, выполненных в рамках инженерно-экологических изысканий проекта доплеровским акустическим измерителем течений Rio Grande WH 600.

Расчеты по 3D модели в сравнении с расчетами по 2D модели требуют значительных временных и компьютерных ресурсов. Время счета до выхода на квазистационарный режим возрастает на порядок. Исходя из этого, исследовался вопрос корректности использования результатов моделирования по 2D модели для решения следующих задач: экологических (переноса загрязняющих веществ, формирования застойных зон, зон заиливания донных форм и пр.) и технических (в частности, вероятность размыва основания гидротехнических сооружений).



Сравнение результатов по двум рассматриваемым моделям показало их существенное различие (рис.11). Осреднение поля течений по глубине приводит к значительной недооценке скоростей течений по всей исследуемой акватории.

Различия объясняются сложной вертикальной структурой трехмерных течений, особенно в заволноломном пространстве, в зонах переменных глубин (рис.12).

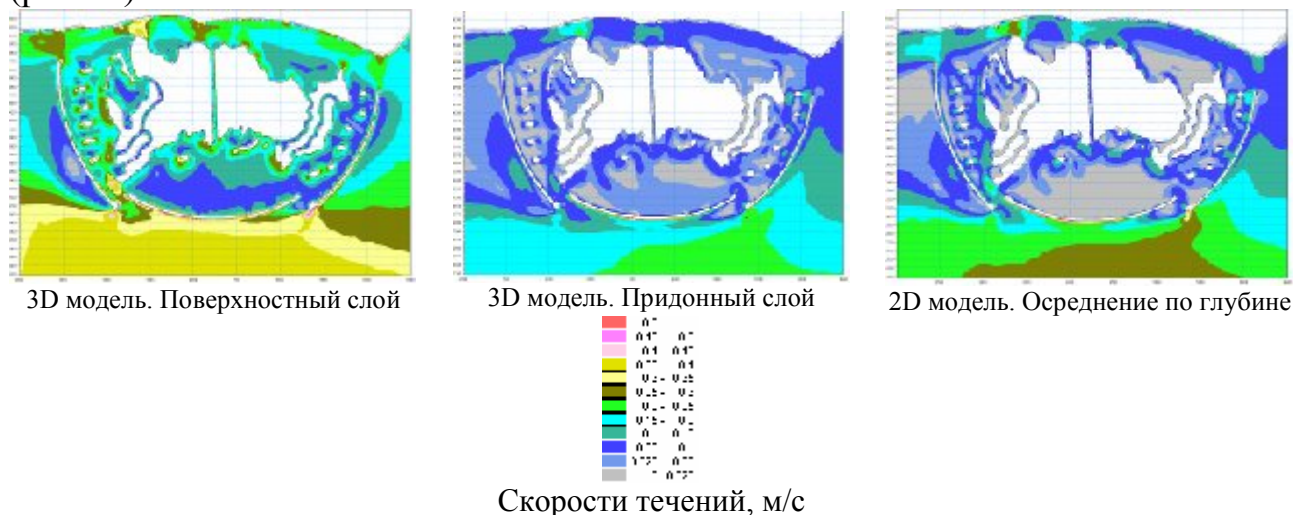


Рис. 11. Юго-восточный перенос. Результаты расчетов скоростей течений по 2D и 3D моделям.

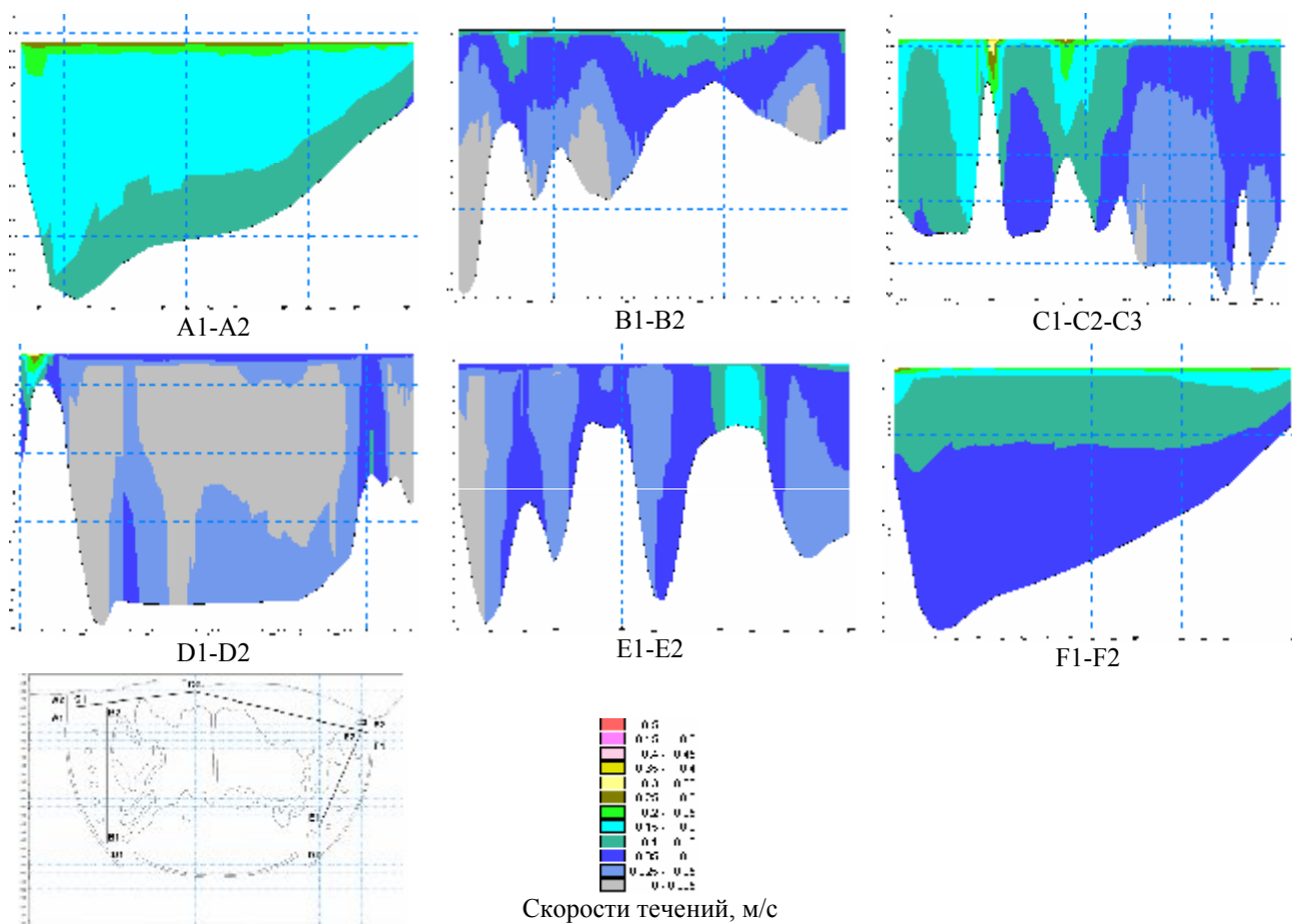


Рис. 12. Юго-восточный перенос. Модули вертикальных скоростей движения.

## **Выводы.**

Спектральная волновая модель SWAN хорошо описывает процессы зарождения, развития ветрового волнения на глубокой воде, трансформацию волнового поля в прибрежной зоне для условий однородной батиметрии, отсутствия особенностей линии берега. При моделировании взаимодействия волнового поля с волноломами, распространения волн в заволноломном пространстве SWAN дает некорректные результаты. В этом случае рекомендуется применение фазоразрешающие модели, например CGWAVE.

Исследования опасных гидродинамических процессов (тягун, толчея) возможно на основе решения уравнений Навье-Стокса (одномерных, двумерных) в приближении Буссинеска.

Корректное описание режима течений, особенно в заволноломном пространстве искусственных территорий, возможно только на основании трехмерных гидродинамических моделей.

*Приведенный в настоящей работе аппарат численного моделирования применяется при исследовании широкого круга задач и частично был совершенствован благодаря поддержке РФФИ, гранты №№ 09-05-96524, 09-05-00543.*

## **Литература.**

1. Атлас волнения и ветра Черного моря. Л.: Гидрометеиздат, 1969. С. 111.
2. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пушкарев О.В. Экстремальное волнение в северо-восточной части Черного моря в феврале 2003 г. Океанология, 2003, т. 43, № 6, с. 948-950.
3. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IV, Черное море. Выпуск 1, Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 429.
4. Регистр СССР. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. Л.: «Транспорт», 1974. С. 359.
5. Booij, N., R. C. Ris, and L. H. Holthuijsen, 1999: A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. J. Geophys. Res., 104, 7649–7666.
6. Demirbilek, Z. and Panchang, V. (1998). “CGWAVE: A coastal surface water wave model of the mild slope equation,” Technical Report CHL-98-26.
7. Divinsky B.V., Kos'yan R.D. Identification and analysis of sea waves climatic directional spectrum. //Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference “A changing coast: challenge for the environmental policies”, 25-28 Nov. 2008, Venice, Italy.
8. Eckart C. The propagation of gravity waves from deep to shallow water. National Bureau of Standards, Circular, 1952, 20:165 ~ 173.