3. УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ МОРСКОЙ/СИНЕЙ ЭКОНОМИКИ В АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ, ЗНАЧЕНИЕ МОРСКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

УДК 332.14

DOI: 10.23885/2500-123X-2020-2-5-131-140

СИСТЕМА МОРСКИХ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ РАСЧЕТОВ И ПРОГНОЗОВ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЗОВСКОГО МОРЯ И КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА

Н.А. Дианский^{1,2,3}, В.В. Фомин^{1,3}, Е.А. Коршенко¹, И.М. Кабатченко^{1,4}

¹ Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

³ Институт вычислительной математики

⁴ Московский физико-технический институт

nikolay.diansky@gmail.com, vladimirfomin@live.com, zhenyakorshenko@gmail.com, wavelab1@yandex.ru

Представлена комплексная Система Морских Ретроспективных расчетов и Прогнозов (СМРП) гидрометеорологических и ледовых характеристик на примере её реализаций для акватории Азовского моря и Керченского пролива. СМРП разрабатывается в ФГБУ «ГОИН». Основными составляющими системы являются региональные модели атмосферы, морской циркуляции, динамики-термодинамики ледяного покрова и ветрового волнения. Для акваторий Азовского моря и Керченского пролива модели морской части СМРП реализованы с высоким пространственным разрешением (500 м и 120–200 м для моделей морской циркуляции Азовского моря Керченского пролива соответственно и 100 м для модели ветрового волнения Керченского пролива). СМРП позволяет проводить как ретроспективные расчёты, так и предоставлять прогнозы гидрометеорологических характеристик. Система позволяет получать практически полный список гидрометеорологических характеристик, необходимых для решения практических задач при планировании хозяйственной или рекреационной деятельности, организации судоходства, предупреждения о возникновении опасных явлений, планирования операций при возникновении чрезвычайных ситуаций и др. Для Азовского моря СМРП реализована в рамках сотрудничества с ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС». Она прошла производственные испытания и в 2019 г. была рекомендована Центральной методической комиссией (ЦМКП) Росгидромета к оперативному использованию. СМРП Керченского пролива реализуется в рамках сотрудничества с ФГБОУ ВО «ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова», находится на этапе тестовой эксплуатации и накопления базы данных прогнозов с целью их последующей верификации по данным гидрологических буев, калибровки параметров используемых моделей и повышения точности получаемых результатов. Результаты прогнозов по СМРП Керченского пролива планируются к использованию для целей судоходства на акватории Керченского пролива.

Ключевые слова: оперативное моделирование, морская циркуляция, Азовское море, Керченский пролив

Азовское море и акватория Керченского пролива имеют важное хозяйственное значение, обусловленное наличием прибрежных городов и поселений, интенсивного судоходства, развитого рыболовства и рекреационного потенциала. Поэтому прогностические расчеты гидротермодинамических характеристик крайне важны для этих видов деятельности, а также для предупреждения о возникновении опасных явлений и для планирования операций минимизации ущерба от чрезвычайных ситуаций. Для акватории Азовского моря уже используются методы прогноза колебаний уровня моря с помощью упрощенных моделей [1, 2].

В настоящей статье представлена Система Морских Ретроспективных расчетов и Прогнозов (СМРП) гидрометеорологических и ледовых условий, разраба-

тываемая и уже используемая в ФГБУ Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова (ГОИН). Она основывается на комплексе физически полных моделей, прогностическими переменными которых являются метеорологические характеристики (скорость и направление ветра, давление на уровне моря, температура воздуха, осадки), гидрологические характеристики (скорость и направление течений, уровень моря, температура и солёность морской воды), ледовые характеристики (сплочённость, толщина и скорость дрейфа морского льда), а также волновые характеристики (высота, период, длина, направление). Ниже представлено описание реализаций системы применительно к акваториям Азовского моря и Керченского пролива.

Описание системы

ретроспективных и оперативных расчётов гидрометеорологических характеристик

СМРП в различных конфигурациях применяется для краткосрочного прогнозирования и расчетов гидрометеосостояния Западно-Арктических морей России [3], Каспийского моря [4], ретроспективных расчетов Западно-Арктических морей России [5], Охотского и Японского морей [6].

Основными модулями СМРП являются хорошо апробированные региональные модели атмосферной и морской циркуляции, ветрового волнения. В их основе лежат региональная негидростатическая атмосферная модель WRF (Weather Research and Forecasting Model) [7], российская модель морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) с включённой в неё моделью динамики-термодинамики льда [8], модель ветрового волнения PABM (Российская атмосфер-

но-волновая модель) [9]. Кроме того в СМРП могут использоваться и другие модели ветрового волнения, такие как SWAN (Simulating WAVes Nearshore) [10, 11], WaveWatch III [12], Delft 3D WAVE [13], модель морской циркуляции Delft 3D FLOW [13]. К вспомогательным модулям СМРП относятся модули загрузки внешних данных и их конвертации, постобработки результатов расчетов и автоматической передачи данных в случае необходимости. Таким образом, СМРП в общем случае состоит из отдельных блоков, конфигурирование которых позволяет создавать СМРП для различных акваторий. Преимущество этого подхода в том, что таким образом осуществляется унификация, убирается дублирование выполнения однотипных операций и достигается общее упрощение контроля за работой системы в целом. Выделяя отдельные общие блоки, схему технологии СМРП для Азовского моря и Керченского пролива можно представить в следующем виде (рис. 1).

Рис. 1. Обобщенная блок-схема СМРП для акваторий Азовского моря и Керченского пролива

Из представленной на рис. 1 блок-схемы видно, что для СМРП Азовского моря и Керченского пролива идет унификация загрузки исходной гидрометеорологической информации (глобального метеорологического форсинга, спутниковых приповерхностных данных, используемых при усвоении) и расчета регионального атмосферного воздействия по модели WRF. Далее, СМРП Азовского моря включает в себя анализ и прогноз гидротермодинамических характеристик по модели INMOM с пространственным разреше-

нием в 500 м, постобработку результатов расчетов и их дальнейшую передачу в ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС». СМРП Керченского пролива включает в себя анализ и прогноз гидротермодинамических характеристик по модели INMOM, прогноз волновых характеристик по модели PABM, постобработку результатов прогнозов, а также их дальнейшую передачу в ФГБОУ ВО «ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова».

Приведем более подробное описание основных модулей СМРП Азовского моря и Керченского пролива.

Расчет региональной атмосферной циркуляции WRF над акваторией Черного, Азовского и Мраморного морей.

Для анализа и прогноза приводных метеохарактеристик над акваторией Черного, Азовского и Мраморного морей была реализована широко применяемая, открытая региональная негидростатическая атмосферная модель WRF [7]. Модель была реализована с пространственным разрешением 10 км в Ламбертовой проекции (рис. 2).

Рис. 2. Области Черного и Азовского морей, используемые для расчета по модели WRF (а) и версиям модели INMOM для Керченского пролива (б) и акватории Азовского моря (в)

Расчет морской циркуляции Азовского моря и Керченского пролива

Для анализа и прогноза циркуляции в Азовском море и в Керченском проливе были реализованы версии модели INMOM [8]. Эта модель хорошо апробирована и успешно используется для расчета глобальной циркуляции Мирового океана [8, 14], западных морей Российской Арктики [15, 16], а также для Черного, Каспийского, Японского и Балтийского морей [4, 17–19]. Кроме того, глобальная версия INMOM служит океаническим блоком модели земной системы, созданной в ИВМ РАН [20] и участвующей в международных программах по исследованию и прогнозу климатических изменений (CORE (Coordinated Oceanic Reference Experiments) [21], AOMIP (Arctic Ocean Model Intercomparison Project) [22, 23]).

Модель INMOM относится к классу сигма-моделей морской и океанической циркуляции. В ее основе лежит полная система примитивных уравнений гидротермодинамики океана, записанных в координатах сферического слоя в приближениях гидростатики и Буссинеска. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура, соленость, отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности, толщина и сплоченность морского льда. Для

расчета плотности используется уравнение состояния, специально предназначенное для численных моделей [24]. В INMOM включена модель динамики, термодинамики и транспорта морского льда [25], что актуально для замерзающего Азовского моря и северо-западной части Черного моря.

Версия модели INMOM для акватории Азовского моря была реализована с горизонтальным разрешением ~0.5 км. Расчетная область модели представлена на рис. 2.

Для акватории Керченского пролива была реализована отдельная версия модели INMOM на области, включающей как Керченский пролив, так и акватории Черного и Азовского морей (рис. 2). Сеточная область модели Керченского пролива, представленная на рис. 3 была получена путем переноса полюсов обычной сферической системы координат с помощью дробно-линейного преобразования Мебиуса в точки с координатами 36.158321° в.д. 45.265857° с.ш. для северного полюса и 37.134731° в.д. 45.249368° с.ш. для южного полюса. На акватории Керченского пролива пространственное разрешение модели составляет 120–200 м. При удалении от пролива разрешение увеличивается и на периферии Азовского моря составляет 2–3 км. На периферии Черного моря в районе побережья Болгарии разрешение достигает до 10 км. Следует отметить, что реализация отдельной системы прогноза гидротермодинамических характеристик Керченского пролива обусловлена необходимостью достижения более высокого пространственного разрешения для описания локальных островов и кос (о. Тузла, коса Чушка), чего невозможно сделать при разрешении в 500 м, а также для явного учета водообмена между Азовским и Черным морями.

Расчет ветрового волнения РАВМ на акватории Керченского пролива

Для анализа и прогноза характеристик ветрового волнения в версии СМРП для Керченского пролива используется модель РАВМ [9], разработанная в ФБГУ ГОИН. Эта модель хорошо апробирована и позволяет учитывать практически все известные факторы волнообразования: передачу энергии от ветра к волнам, нелинейный обмен энергией между спектральными составляющими волнения, диссипацию энергии вследствие обрушения гребней и придонных эффектов; учитываются обмен энергией волн с течениями, стратификация атмосферы, колебания уровня моря, подвижная кромка льда. Модель была реализована с пространственным разрешением в 100 м. По решению ЦМКП в 2001 г. РАВМ рекомендована в практику оперативных работ.

Область моделирования модели РАВМ представлена на рис. 4.

Рис. 3. Сеточная область Керченской версии модели INMOM
(точками показаны узлы сеточной области)

Рис. 4. Сеточная область модели РАВМ для акватории Керченского пролива

Верификация модулей СМРП

Все модули СМРП Азовского моря и Керченского пролива реализованы в первую очередь для решения практических задач. Поэтому, прежде чем вводить их в опытную эксплуатацию они должны пройти несколько стадий верификации, которые необходимы для оценки точности прогнозов, осуществляемых с использованием СМРП, а также для понимания уровня ошибки прогнозов. С моделью WRF были проведены расчеты атмосферной циркуляции за период с 1 января по 31 марта 2013 г., характеризующимся большими зимними скоростями ветра, а также возникновением экстремального нагона в Таганрогском заливе (второй по значимости за более чем 100-летний период инструмен-

тальных наблюдений). Результаты моделирования были верифицированы по данным прибрежных гидрометеорологических станций (ГМС), расположенных в Таганроге, Мариуполе, Приморско-Ахтарске, Керчи и Геническе. Для верификации модели использовались поля ветра, так как именно скорость и направление ветра являются главными факторами формирования и изменения уровня моря в Азовском море. Для сравнительного анализа из сеточных массивов метеополей выбирались ближайшие к метеостанциям узлы.

В таблице 1 представлены средние по всем станциям значения коэффициента корреляции и среднеквадратичного отклонения (СКО) результатов измерений от данных наблюдений.

Таблица 1. Средние для всех 5-ти метеостанций значения коэффициента корреляции (Корр) и СКО (м/с) для скорости, рассчитанной по модели WRF

Тип атмосферных данные	Модуль скорости ветра		Зональная компонента скорости ветра		Меридиональная компонента скорости ветра	
	Корр	СКО	Корр	СКО	Корр	СКО
WRF	0.77	1.35	0.88	1.42	0.85	1.43

Результаты расчета показывают, что наблюдаются высокие значения коэффициента корреляции и небольшие значения СКО как для модуля скорости ветра, так и для его компонент. При этом высокие значения коэффициента корреляции для зональной и меридиональной компонент скорости ветра позволяют говорить о том, что с высокой степенью точности воспроизводится не только модуль скорости ветра, но также и его направление.

Модуль СМРП Азовского моря верифицировался в несколько этапов. Наряду с экстремальными сгонно-нагонными явлениями, характерными для Азов-

ского моря, дополнительную угрозу в зимний период может представлять наличие льда на его акватории. Для оценки точности воспроизведения ледовых характеристик были проведены в диагностическом режиме расчеты по модели INMOM для Азовского моря по воспроизведению динамики и термодинамики морского льда с 1 января по 31 декабря 2017 г. На рисунках 5а и 5б представлены карты сплоченности льда, полученные по результатам расчета, а также представленные в виде карт объективного анализа, взятые с сайта <http://hmc.meteorf.ru/sea>.

Рис. 5. Ледовые условия в Азовском море по данным Азовской версии модели INMOM (а) и оперативного модуля ЕСИМО (б) 17 января 2017 г.

Более детальные оценки точности в воспроизведении ледовых характеристик проводились и для зимнего сезона 2018–2019 гг. по данным 8-ми береговых станций ГМС: «Геническ», «Бердянск», «Таганрог», «Ейск», «Должанская», «Приморско-Ахтарск», «Темрюк» и «Мысовое». Результаты расчетов показывают, что процент оправдавшихся прогнозов по наличию/отсутствию льда на прилегающей к станции акватории варьируется от 65 до 100 %, при этом 100 % оправдываемость наблюдаются для станций, находящихся в южной части Азовского моря, где ледовые условия существенно отличаются от его северной части.

С августа 2019 г. по настоящее время организована передача результатов прогнозов, полученных по СМРП Азовского моря, в ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» на регулярной основе. На основе переданных данных за период с 20 августа 2019 г. по 30 ноября 2019 г. были проведены производственные испытания, заложенной в СМРП технологии диагноза и прогноза на 3 суток скорости течений, уровня моря, температуры и солености морской воды, а также характеристик морского льда для Азовского моря. Оценка точности прогнозов проводилась по 5-ти станциям ГМС: «Таганрог», «Ейск», «Должанская», «Приморско-Ахтарск» и «Темрюк».

Таблица 2. Оправдываемость (%) прогнозов уровня моря и температуры воды, полученных с использованием СМРП Азовского моря

СК УГМС	Уровень моря				Температура			
	День прогноза			Итого	День прогноза			Итого
	1	2	3		1	2	3	
Таганрог	80	81	79	80	69	68	69	69
Ейск	89	81	81	84	77	82	83	81
Должанская	76	71	72	73	72	77	79	76
Приморско-Ахтарск	86	82	77	82	68	67	68	68
Темрюк	88	82	78	83	74	77	81	77
Итого:	84	80	78	80	72	74	76	74

Согласно полученным результатам оправдываемость прогнозов уровня воды по прибрежным станциям составила 84 % на первые сутки, 80 % на вторые сутки и 78 % на третьи сутки. Оправдываемость температуры воды поверхностного слоя моря составила 72 %, 74 % и 76 % соответственно. Результаты расчетов в сравнении с существующими методами прогноза с использованием численных моделей показали, что реализованная СМРП позволяет повысить точность прогнозов колебаний уровня моря на 10–15 %. По результатам испытаний представленная система была рекомендована Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета РФ к оперативному использованию.

Результаты прогнозов по СМРП Азовского моря

СМРП Азовского моря и Керченского пролива работают в оперативном режиме при постоянном контроле корректности прогнозов. За период опытной эксплуатации СМРП Азовского моря на его акватории были зафиксированы несколько неблагоприятных и опасных явлений. Так, в период с 21 по 24 ноября 2019 г. на акватории Азовского

моря наблюдались значительные стонно-нагонные колебания, которые были вызваны продолжительным действием восточных и восточно-северо-восточных ветров. Постоянное действие ветра со значительными скоростями привело к развитию стонно-нагонного колебания, при котором в восточной части Азовского моря наблюдался экстремальный стгон, а в западной – нагон. Уровень моря за период штормовой ситуации в Таганрогском заливе ночью с 21 на 22 ноября 2019 г. согласно прогнозам, опускался ниже – 220 – - 240 см относительно среднего уровня (рис. 6). Максимальные нагонные повышения уровня моря наблюдались в прибрежной западной части Азовского моря и достигали 130–140 см.

Сопоставление прогнозных и фактических значений показало, что СМРП Азовского моря позволила воспроизвести и предсказать наступление неблагоприятных условий и воспроизвести стгонно-нагонное колебание, но в тоже время амплитуда сгона была несколько занижена. Ввиду постоянного развития СМРП Азовского моря в настоящее время проводятся работы по улучшению системы с целью предоставления более точных прогнозов гидротермодинамического режима Азовского моря.

Рис. 6. Уровень моря (см), отсчитываемый относительно среднего уровня Азовского моря по состоянию на 04:00 22 ноября 2019 г.

Результаты прогнозов СМРП Керченского пролива

СМРП Керченского пролива была запущена в ФГБУ «ГОИН» в режиме тестовой эксплуатации в июле 2019 г. в рамках совместной работы с ФГБОУ

ВО «ГМУ адмирала Ф.Ф. Ушакова». В настоящее время идет накопление результатов прогнозов, а также накопление данных измерений с установленных в Керченском проливе гидрологических буев. При накоплении достаточного ряда данных будет осу-

ществляться верификация СМРП, а также калибровка и настройка параметров моделей WRF, INMOM и PAVM, реализованных в качестве модулей СМРП Керченского пролива. На рис. 7 представлены результаты работы СМРП по расчету и прогнозу скорости

ветра, приповерхностных скоростей течений и высот значительных высот волн. Акватория, представленная на рис. 7, расположена в центральной части Керченского пролива и является тестовым полигоном для дальнейшей отладки и верификации СМРП.

Рис. 7. Поле скорости ветра, м/с (а) скорости течений, м/с (б) и значительные высоты волн, м (в) по результатам расчета на 14:00 09.08.2020. Для векторных полей показана каждая 7-я точка по долготе и широте, оттенками серого цвета показаны величины скоростей.

Заключение

В ФГБУ ГОИН для решения практических и научных задач разработана Система Морских Ретроспективных расчетов и Прогнозов (СМРП) гидрометеорологических и ледовых характеристик. Основные модули СМРП основаны на хорошо апробированных региональных моделях атмосферы WRF; морской циркуляции INMOM, включающей модель динамики-термодинамик морского льда; ветрового волнения PAVM. Здесь были рассмотрены реализации СМРП для акваторий Азовского моря и Керченского пролива.

Проведенная верификация и апробация СМРП Азовского показала её достаточную для практического применения точность. В 2019 г. ЦМКП Росгидромета она была рекомендована к оперативному использованию. В настоящее время результаты прогнозов с ее использованием передаются в ежедневном режиме в Северо-Кавказское УГМС. Версия СМРП для Керченского пролива находится

в тестовой эксплуатации и режиме накопления базы данных. Совместно с ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова» и с использованием данных с гидрологических буев, расположенных на акватории Керченского пролива, будет проведена ее верификация, а также калибровка параметров используемых моделей. По окончании работ, СМРП Керченского пролива планируется к внедрению в опытную эксплуатацию для обеспечения хозяйственной деятельности и безопасности судоходства Керченском проливе и прилегающих к нему акваторий.

Работа выполнена в рамках темы 4.6 Плана НИИТР Росгидромета (утв. Приказом Росгидромета №745 от 31.12.2019) «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга гидрохимического состояния и загрязнения морей России и оценки гидрологического и гидрохимического состояния морей и морских устьев рек».

Литература

1. Попов С.К., Лобов А.Л. Диагноз и прогноз наводнения в Таганроге по оперативной гидродинамической модели // Труды ГУ «ГМЦ РФ». – 2016. – Вып. 362. – С. 92–108.
2. Филиппов Ю.Г., Фомин В.В. Методика и результаты краткосрочного прогноза уровня Азовского моря // Труды ГОИН. – 2017. – Вып. 218. – С. 137–143.
3. Дианский Н.А., Панасенкова И.И., Фомин В.В., Гусев А.В., Кабатченко И.М. Система оперативных и ретроспективных расчетов гидрометеорологических параметров и морского льда для западных морей российской Арктики // Морские информационно-управляющие системы. 2020. Т. 17. № 1. С. 44–51.
4. Фомин В.В., Дианский Н.А., Выручалкина Т.Ю. Апробация системы оперативного диагноза и прогноза гидрометеорологических характеристик на акватории Каспийского моря // Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 2018. Т. 24, №1. С. 321–333. doi:10.24057/2414-9179-2018-1-24-321-333.
5. Дианский Н. А., Панасенкова И. И., Фомин В. В. Исследование отклика верхнего слоя Баренцева моря на прохождение интенсивного полярного циклона в начале января 1975 года // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 6. С. 530–548. doi:10.22449/0233-7584-2019-6-530-548.
6. Дианский Н.А., Степанов Д. В., Фомин В. В., Чумаков М. М. Особенности циркуляции у северо- восточного побережья о. Сахалин при прохождении трех типов глубоких циклонов над Охотским морем // Метеорология и гидрология. – 2020. Т. 45. № 1. С. 29–38.
7. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., Powers J.G. 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Notes. doi:10.5065/D68S4MVH
8. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
9. Кабатченко И.М., Матушевский Г.В., Резников М.В., Заславский М.М. Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 61–71.
10. Booij, N., R. Ris and L. Holthuijsen, 1999. “A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation.” Journal of Geophysical Research 104 (C4): 7649–7666.
11. Ris, R., N. Booij and L. Holthuijsen, 1999. “A third-generation wave model for coastal regions, Part II: Verification.” Journal of Geophysical Research 104 (C4): 7667–7681.
12. Tolman, H. L., 2002: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 2.22. Technical note 222, NCEP/NOAA/NWS, National Center for Environmental Prediction, Washington DC.
13. Deltares, 2009. User Manual Delft3D-FLOW, version 3.14, Delft, Netherlands.
14. Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и её климатической изменчивости в 1948–2007 гг. с помощью модели INMOM // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50. – № 1. – С. 3–15.
15. Дианский Н.А., Кабатченко И.М., Фомин В.В., Архипов В.В., Цветинский А.С. Моделирование гидрометеорологических характеристик в Карском и Печорском морях и расчет наносов у западного побережья полуострова Ямал // Вести газовой науки. – 2015. – № 2(22). – С.98–105.
16. Дианский Н.А., Фомин В.В., Кабатченко И.М., Грузинов В.М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // Арктика: экология и экономика. – 2014. – № 1(13). – С. 57–73.
17. Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V., Moshonkin S.N., Demyshev S.G.. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2012. – 27(1). – P. 95–111.
18. Степанов Д.В., Дианский Н.А., Новотрясов В.В. Численное моделирование циркуляции вод Японского моря и исследование её долгопериодной изменчивости в центральной части в период 1958–2006 гг // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50. – № 1. – С. 84–96.
19. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А., Гусев А. В., Дианский Н.А. Сравнение методов численного гидродинамического моделирования колебаний уровня Балтийского моря // Труды Государственного океанографического института. – 2016. – № 217. – С. 22–42.
20. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX–XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // Известия РАН, физика атмосферы и океана. – 2013. – Т.49. – №4. – С.379–400.
21. Danabasoglu G., et al.: North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part II: Inter-annual to decadal variability, Ocean Modell., 97, 65–90, doi:10.1016/j.ocemod.2015.11.007, 2016.
22. Downes S. M., et al.: An assessment of Southern Ocean water masses and sea ice during 1988–2007 in a suite of interannual CORE-II simulations, Ocean Modell., 94, 67–94, doi:10.1016/j.ocemod.2015.07.022, 2015.
23. Farneti R., et al.: An assessment of Antarctic Circumpolar Current and Southern Ocean meridional overturning circulation during 1958–2007 in a suite of interannual CORE-II simulations, Ocean Modell., 93, 84–120, doi:10.1016/j.ocemod.2015.07.009, 2015
24. Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // J. Geoph. Res. – 1999. – V. 104. – No. C1. – P. 1537–1540.
25. Яковлев Н.Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // Известия РАН, ФАО. – 2009. – Т. 45. – № 3. – С. 1–16.

HINDCAST AND OPERATIONAL FORECASTING SYSTEM OF HYDROMETEOROLOGICAL CHARACTERISTICS FOR THE SEA OF AZOV AND KERCH STRAIT

N.A. Diansky^{1,2,3}, V.V. Fomin^{1,3}, E.A. Korshenko¹, I.M. Kabatchenko^{1,4}

¹Zubov State Oceanographic Institute

²Lomonosov Moscow State University

³Marchuk Institute of Numerical Mathematics

⁴Moscow Institute of Physics and Technology

nikolay.diansky@gmail.com, vladimirfomin@live.com, zhenyakorshenko@gmail.com, wavelab1@yandex.ru

Abstract. The paper presents Marine Hindcast and Forecasts System (MHFS) of hydrometeorological and ice characteristics for the Sea of Azov and Kerch Strait. It is being developed at the Federal State Budgetary Institution "N.N. Zubov State Oceanographic Institute" (FSBI "SOI"). The main components of this system include regional models of the atmosphere, marine circulation, dynamics-thermodynamics of ice cover and wind waves. For the Sea of Azov and Kerch Strait, marine circulation models of the MHFS were implemented with a high spatial resolution (500 m and 120–200 m for the Sea of Azov and the Kerch Strait marine circulation models respectively and 100 m for the Kerch Strait wind waves mode). The MHFS allows both hindcast calculations and operational analyzes and forecasts of hydrometeorological conditions in the study areas. Additionally, this system allows to obtain an almost complete list of hydrometeorological characteristics which are necessary for solving practical problems in planning economic or recreational activities, organizing navigation, warning of hazardous events, planning operations in case of emergencies, etc. For the Sea of Azov, the MHFS was implemented in cooperation with the Federal State Budgetary Institution "North-Caucasian Administration for Hydrometeorology and Environmental monitoring" (FSBI "North-Caucasian AHM"). In 2019 the system was recommended for the practical implementation by the Roshydromet Central Methodical Commission on Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecasts. The Kerch Strait MHFS is being implemented in cooperation with the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Admiral F.F. Ushakov" and now at the stage of tests and accumulation of the forecast database for the purpose of their subsequent verification using hydrological buoy data, calibration of models' parameters and increasing the accuracy of the obtained results. The Kerch Strait MHFS results are planned to be used for navigation in the Kerch Strait.

Keywords: operational modeling, marine circulation, Sea of Azov, Kerch Strait

References

1. Popov S.K., Lobov A.L. "Diagnoz i prognoz navodneniya v Taganroge po operativnoj gidrodinamicheskoy modeli" [Diagnosis and forecasts of flood in Taganrog with the help of an operational hydrodynamic model]. Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2016, vol. 362, pp. 92–108. (in Russian)
2. Filippov Yu.G., Fomin V.V. "Metodika i rezul'taty kratkosrochnogo prognoza urovnya Azovskogo morja" [Method and results of short-dated prediction of the level of the Azov sea]. Trudy GOIN [Proceedings of the State Oceanographic Institute], 2017, vol. 218, pp. 137–143. (in Russian)
3. Diansky N.A., Panasenkov I.I., Fomin V.V., Gusev A.V., Kabatchenko I.M. "Sistema operativnyh i retrospektivnyh raschetov gidrometeorologicheskikh parametrov i morskogo l'da dlja zapadnyh morej rossijskoj Arktiki" [Hindcast and operational forecasting system of hydrometeorological characteristics and sea ice for the Western Seas of the Russian Arctic]. Morskoe informacionno-upravljajushhie sistemy [Marine Information and Control Systems], 2020, vol. 17, no. 1, pp. 44–51. (in Russian)
4. Fomin V.V., Diansky N.A., Vyruchalkina T.Yu. "Aprobacija sistemy operativnogo diagnoza i prognoza gidrometeorologicheskikh harakteristik na akvatorii Kaspijskogo morja" [Approval of the operational diagnose and forecasting system of hydrometeorological characteristics for Caspian sea]. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii «InterKarto. InterGIS» [Proceedings of the International conference "InterCarto. InterGIS"], 2018, vol. 24, no. 1, pp. 321–333. (in Russian)
5. Diansky N.A., Panasenkov I.I., Fomin V.V. "Issledovanie otklika verhnego sloja Barentseva morja na prohozhdenie intensivnogo poljarnogo ciklona v nachale janvarja 1975 goda" [Investigation of the Barents Sea Upper Layer Response to the Polar Low in 1975]. Morskoy Gidrofizicheskij Zhurnal, 2019, vol. 35, no. 6, pp. 530–548. (in Russian). doi: 10.22449/0233-7584-2019-6-530-548
6. Diansky N.A., Stepanov D.V., Fomin V.V., Chumakov M.M. Water circulation off the northeastern coast of Sakhalin during the passage of three types of deep cyclones over the sea of Okhotsk. Russian Meteorology and Hydrology, 2020, vol. 45, no. 1, pp. 29–38. (in English) doi: 10.3103/s1068373920010045
7. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., Powers J.G. 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Notes. (in English) doi:10.5065/D68S4MVH
8. Diansky, N.A. "Modelirovanie cirkulyacii okeana i issledovanie ego reakcii na korotkoperiodnye i dolgoperiodnye atmosferynye vozdeystviya" [Modeling of the ocean circulation and study of its response to short-period and long-period atmospheric impacts], Moscow, Fizmatlit, 2013, 272 p. (in Russian)

9. Kabatchenko I.M., Matushevskij G.V., Reznikov M.V., Zaslavskij M.M. "Modelirovanie vetra i voln pri vtorichnyh termicheskikh ciklonah na Chernom more" [Numerical modeling of wind and waves in a secondary cyclone at the Black sea], 2001, Meteorologiya i Gidrologiya, no. 5, pp. 61–71. (in Russian)
10. Booij N., R. Ris and L. Holthuijsen, 1999. "A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation." Journal of Geophysical Research 104 (C4): 7649–7666. (in English)
11. Ris R., N. Booij and L. Holthuijsen, 1999. "A third-generation wave model for coastal regions, Part II: Verification." Journal of Geophysical Research 104 (C4): 7667–7681. (in English)
12. Tolman H.L., 2002: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 2.22. Technical note 222, NCEP/NOAA/NWS, National Center for Environmental Prediction, Washington DC. (in English)
13. Deltares, 2009. User Manual Delft3D-FLOW, version 3.14, Delft, Netherlands. (in English)
14. Gusev A.V., Diansky N.A. Numerical simulation of the world ocean circulation and its climatic variability for 1948–2007 using the INMOM. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 1–12. (in English) doi: 10.1134/S0001433813060078
15. Diansky, N.A., Kabatchenko I.M., Fomin V.V. et al. "Modelirovaniye gidrometeorologicheskikh kharakteristik v Karskom i Pechorskom moryakh i raschet nanosov u zapadnogo poberezya poluostrova Yamal" [Simulation of the hydrometeorological characteristics for the Kara and the Pechora seas and calculation of drifts nearby the western cost of the Yamal Peninsula] Vesti Gazovoy Nauki, 2015, no. 2(22), pp. 98–105. (in Russian)
16. Diansky N.A., Fomin V.V., Kabatchenko I.M., Gruzinov V.M. "Vosproizvedenie cirkuljacii Karskogo i Pechorskogo morej s pomoshh'ju sistemy operativnogo diagnoza i prognoza morskoy dinamiki" [Simulation of circulation of the Kara and Pechora Seas through the system of express diagnosis and prognosis of marine dynamics]. Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economy], 2014, vol. 13, no. 1, pp. 57–73. (in Russian)
17. Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V., Moshonkin S.N., Demyshev S.G. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2012, vol. 27, no. 1, pp. 95–111. (in English)
18. Stepanov D.V., Diansky N.A., Novotryasov V.V. Numerical simulation of water circulation in the central part of the Sea of Japan and study of its long-term variability in 1958–2006. Izvestiya AN. Fizika Atmosfery i Okeana, 2014, Vol. 50, no. 1, pp. 84–96. (in English) doi: 10.1134/S0001433813050149
19. Zaharchuk E.A., Tikhonova N.A., Gusev A.V., Diansky N.A. "Sravnenie metodov chislennogo gidrodinamicheskogo modelirovaniya kolebanij urovnja Baltijskogo morja". Trudy GOIN [Proceedings of the State Oceanographic Institute], 2016, vol. 217, pp. 22–42. (in Russian)
20. Volodin E.M., Diansky N.A. and Gusev A.V. Simulation and Prediction of Climate Changes in the 19th to 21st Centuries with the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Model of the Earth's Climate System. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 2013, vol. 49, no. 4, pp. 347–366. (in English)
21. Danabasoglu G., et al.: North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part II: Inter-annual to decadal variability, Ocean Modell., 97, 65–90. (in English) doi:10.1016/j.ocemod.2015.11.007, 2016.
22. Downes S. M., et al.: An assessment of Southern Ocean water masses and sea ice during 1988–2007 in a suite of interannual CORE-II simulations, Ocean Modell., 94, 67–94. (in English) doi:10.1016/j.ocemod.2015.07.022, 2015.
23. Farneti R. et al. An assessment of Antarctic Circumpolar Current and Southern Ocean meridional overturning circulation during 1958–2007 in a suite of interannual CORE-II simulations, Ocean Modell., 93, 84–120. (In English) doi:10.1016/j.ocemod.2015.07.009, 2015
24. Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // J. Geoph. Res. – 1999. – V. 104. – No. C1. – P. 1537–1540. (In English)
25. Yakovlev N.G. "Vosstanovlenie krupnomasshtabnogo sostoyaniya vod i morskogo l'da Severnogo Ledovitogo okeana v 1948–2002 gg. Chast' 1: Chislennaya model' i srednee sostoyanie" [Reproduction of the large-scale state of water and sea ice in the Arctic Ocean from 1948 to 2002. Pt. 1. Numerical model and the average state]. Izvestiya RAN, FAO [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics], 2009, no. 3, pp. 1–16. (In Russian)