

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА. ЧАСТЬ 1: ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ

В. В. Фомин^{1,2}, Е. А. Коршенко¹, И. М. Кабатченко^{1,3},
А. В. Гусев^{1,2,4}, Н. А. Дианский^{1,2,5}

*¹Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, Росгидромет,
Россия, 119034, Москва, Кропоткинский пер., д. 6,
e-mail: kekarop@gmail.com;*

*²Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 8;*

*³Московский физико-технический институт,
Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9;*

*⁴Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117218, Москва, Нахимовский пр., д. 36;*

*⁵МГУ имени М. В. Ломоносова,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1*

В первой части статьи показаны результаты верификации разработанной в ФГБУ «ГОИН» технологии – системы морских расчетов и прогнозов (СМРП), адаптированной для условий Керченского пролива. Она представляет собой комплекс численных моделей расчета атмосферных, волновых и гидрологических характеристик Черного и Азовского морей. Эта технология использовалась для обеспечения проектирования и строительства мостового перехода через Керченский пролив. Продемонстрированы возможности воспроизведения гидрологических характеристик, необходимых для практических целей, путем сопоставления модельных расчетов с данными наблюдений. Предполагается использование представленной технологии расчетов гидрометеорологических параметров Керченского пролива для системы мониторинга, разрабатываемой в рамках проекта РНФ № 21-17-00191 «Мониторинг водообмена через Керченский пролив на основе современных методов наблюдений и численного моделирования». Во второй части будут представлены режимные характеристики гидрологических условий в акватории Керченского пролива.

Ключевые слова: численное моделирование, Керченский пролив, гидрометеорологические характеристики

1. Введение

Гидрологический режим Керченского пролива представляет значительный интерес ввиду его активного хозяйственного использования. Для планирования хозяйственной деятельности, предупреждения об опасных или неблагоприятных гидрометеорологических условиях требуется знание как о его гидрометеорологическом режиме, так и создание систем мониторинга, позволяющих получать в реальном времени информацию о текущем состоянии окружающей среды, а также прогноз ее

изменений. Публикация настоящей серии работ, по нашему мнению, представляет интерес как с точки зрения демонстрации возможностей моделирования для практических целей, особенно в сравнении с полученными данными наблюдений, так и с точки зрения информации о гидрологическом режиме рассматриваемой акватории при отсутствии/наличии транспортного перехода через Керченский пролив. Кроме того, именно представленная технология расчета гидрометеорологических параметров Керченского пролива будет использоваться для системы мониторинга, разрабатываемой в рамках проекта РНФ № 21-17-00191 «Мониторинг водообмена через Керченский пролив на основе современных методов наблюдений и численного моделирования». Поэтому ее верификация, представленная в данной статье, также представляет интерес.

В настоящей работе проведен анализ гидрометеорологической обстановки с использованием современных методов численного моделирования в акватории Керченского пролива в условиях отсутствия Керченского моста. Крымский мост представляет собой транспортный переход через Керченский пролив, соединяющий Керченский и Таманский полуострова через остров Тузла и Тузлинскую косу. Ввиду своей уникальности и протяженности, Крымский мост является гидротехническим сооружением повышенной категории сложности. ФГБУ «ГОИН» совместно с Севастопольским отделением в 2014–2017 гг. выполняли задачи общегосударственного значения по инженерно-гидрометеорологическим изысканиям для технико-экономического обоснования строительства транспортного перехода через Керченский пролив. С этой целью сотрудники ФГБУ «ГОИН» в эти годы принимали активное участие в экспедиционных и камеральных работах, результаты которых приводятся в данной статье.

В свою очередь, Керченский пролив является районом интенсивного судоходства и хозяйственного освоения. Гидрометеорологические условия Керченского пролива определяются сложным сочетанием различных параметров гидрометеорологического и ледового режима, которое приводит к возникновению неблагоприятных или опасных явлений. Полное и точное знание гидрометеорологических условий имеет важнейшее значение для обеспечения потребностей функционирования и безопасной эксплуатации транспортного перехода через Керченский пролив и эффективного проведения морских работ в данной акватории.

Большинство работ, посвященных изучению гидрологии Керченского пролива до периода активного техногенного воздействия, основываются на данных экспедиционных наблюдений (Инжебейкин, Аксенов, 2019; Сытник, 2020). Ввиду недостаточной длины рядов наблюдений за основными морскими гидрологическими параметрами (течения, волнение, температура и соленость воды) и неравномерного распределения по пространству данных наблюдений, имеющихся для акватории Керченского пролива, определение расчетных характеристик гидрометеорологического режима непосредственно по данным наблюдений, за редким исключением, не представляется возможным. В этом случае необходимо использовать результаты математического моделирования.

В работе (Дьяков и др., 2019) дается анализ гидрометеорологической изученности и ледовых условий Керченского пролива. Кроме того, в этой работе исследуется динамика вод по данным численного моделирования с использованием совместной модели ADCIRC (Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries) + SWAN (Simulation Waves Nearshore), которые применяются для расчета штормовых нагонов и ветрового волнения. В результате численных экспериментов получены экстремальные значения высот волн, подъемов уровня моря и скоростей течений в 30-ти характерных точках Керченского пролива для типовых полей ветра и для условий экстремального шторма в ноябре 2007 г. Получены статистические характеристики ветрового волнения в Керченском проливе по данным ретроспективного анализа ERA Interim за 1979–2017 гг. и представлены результаты численного моделирования ветро-волновых течений в Керченской бухте, а также данные расчета водообмена через северную узость Керченского пролива.

В данной работе представлена технология регионального моделирования термогидродинамических и ледовых условий для Керченского пролива с высоким пространственным разрешением, основанная на использовании системы морских расчетов и прогнозов (СМРП), разработанной в ФГБУ «ГОИН». В работе для получения расчетных параметров гидрометеорологического режима (в части расчета метеорологических и термогидродинамических параметров) использовались современные модели и методы численных расчетов, которые позволяют обеспечить высокое качество и достоверность получаемых результатов.

2. Материалы и методы

Для обеспечения проектирования и строительства мостового перехода через Керченский пролив использовалась оригинальная технология, получившая в последствии название системы морских расчетов и прогнозов (СМРП) (Дианский и др., 2020; Сенченко, 2022), которая представляет собой комплекс численных моделей расчета атмосферных, волновых и гидрологических характеристик Черного и Азовского морей, адаптированный для условий Керченского пролива (рисунок 1). Данный комплекс включает региональную негидростатическую модель циркуляции атмосферы WRF (Weather Research and Forecasting model) (Skamarock, 2008), необходимую для расчета атмосферного воздействия на поверхности моря; модель морской циркуляции INMOM (Institute Numerical Mathematics Ocean Model) (Дианский, 2013; Moshonkin et al., 2018) для расчета течений, уровня, температуры, солености моря и морского льда и РАВМ (Российская атмосферно-волновая модель) (Кабатченко и др., 2001) для расчета ветро-волновых характеристик (высоты и направления волнения, спектра волнения). Рассчитанные характеристики течений и ветрового волнения при необходимости могут использоваться в реализованной модели литодинамических процессов (Введенский и др., 2016), основанной на энергетической концепции Бэнольда (Bagnold, 1963), а также и для расчета нагрузок на гидroteхнические сооружения.

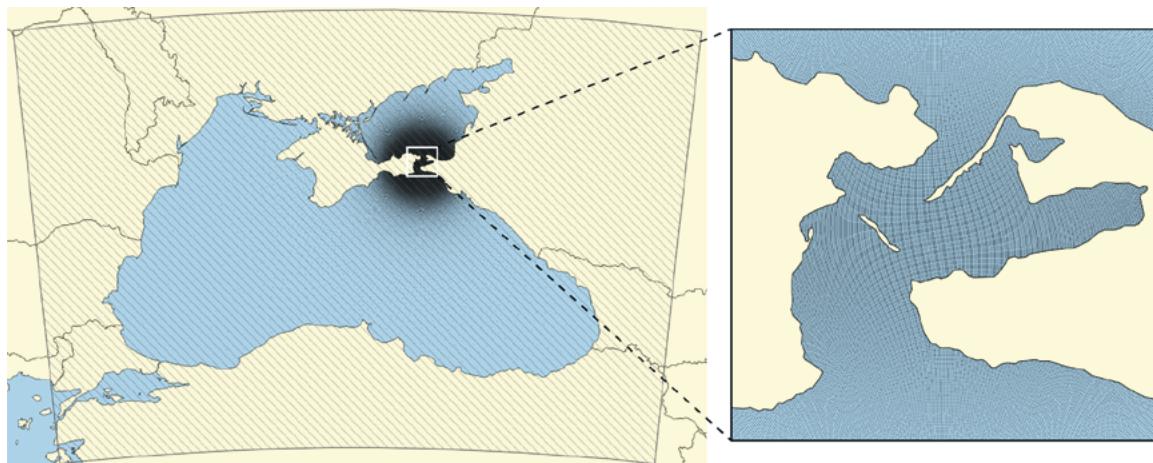


Рис. 1 – Штриховкой обозначена область Черного и Азовского морей, используемая для расчета атмосферных характеристик по модели WRF (слева), для модели INMOM точками показаны узлы сеточной области над акваторией Черного и Азовского морей (слева) и детализированная сеточная область на акватории Керченского пролива (справа)

2.1. Модель атмосферной циркуляции

Атмосферные условия Керченского пролива имеют очень сложный характер. Поэтому необходимо использовать региональные атмосферные модели типа RegCM, COSMO или WRF, которые позволяют рассчитывать весь комплекс метеопараметров, необходимых для расчета потоков импульса, тепла и влаги на поверхности моря с высоким пространственным разрешением, особенно необходимым вблизи береговой черты. Это позволяет описывать атмосферные условия как над открытой частью Черного и Азовского морей, так и над его прибрежными акваториями. Последнее особенно важно при расчете прибрежной морской циркуляции.

Результаты моделирования по региональным моделям атмосферы используются не только для расчета режимных атмосферных характеристик в требуемом регионе, но также в качестве атмосферного воздействия для модели волнения и модели морской циркуляции. При этом для наиболее полного и качественного моделирования параметров морской циркуляции и термохалинных характеристик необходим расчет полного атмосферного воздействия. Для этого используются характеристики атмосферных приводных параметров (зональная и меридиональная компоненты скорости ветра на высоте 10 м; давление на уровне моря; влажность и температура воздуха на высоте 2 м; осадки; потоки коротковолновой и длинноволновой радиации). Расчет турбулентных потоков тепла, пресной воды и импульса на поверхности океана осуществлялся согласно балк-формулам (Гилл, 1986). Сток рек задается в виде псевдо-осадков, сосредоточенных в акваториях, примыкающих к устьям рек, задаваемых в соответствии с величинами стоков рек.

Область моделирования по региональной модели атмосферы должна охватывать максимальную из областей моделирования по морской модели. Анализируя расположение Керченского пролива, важно отметить, что структура полей течений, а также

термохалинных характеристик, будет определяться не только распределившимися Азовскими водами, но и водообменом с Черным морем. Таким образом, расчетная область должна включать Азовское море и северо-восточную часть Черного моря.

Необходимые характеристики атмосферных приводных параметров рассчитывались по широко известной модели WRF (Skamarock, 2008), разработанной организациями NCEP (National Centers for Environmental Prediction) и NCAR (National Center of Atmospheric Research) и реализованной для всего Черноморского региона с пространственным разрешением 10 км в Ламбертовой проекции. Расчетная область модели WRF показана слева на рисунке 1. В качестве данных для задания начальных и граничных условий в модели WRF при расчетах использовались данные FNL (Final Operational Global Analysis), представленные с пространственным разрешением 1° и шагом по времени 6 часов.

2.2. Модель морской циркуляции

Течения, поля температуры и солености формируются в результате сложных физических процессов, главными из которых являются втекание распределившихся вод Азовского моря и соленых вод из Черного моря и многокомпонентного атмосферного воздействия. Необходимо отметить, что бароклинный радиус деформации Россби в данных морях имеет величины порядка 5–15 км. Это значит, что значительный вклад в общую циркуляцию моря осуществляют бароклиновые вихри с размером порядка двух радиусов Россби. Подобная вихревая структура отмечается в ряде работ, как по наблюдениям (Kubryakov and Stanichny, 2015), так и по результатам численного моделирования (Sadighrad et al., 2021). Поскольку мезомасштабные вихри осуществляют значительный вклад в формирование сложной структуры поля течений, то они также будут в значительной степени определять распространение загрязняющих веществ, например, от аварийных разливов нефти. Следует отметить, что формирование мезомасштабных квазигеострофических вихрей происходит при активном взаимодействии течений и плотностной стратификации. Поэтому представляется необходимым и оправданное использование сложной и физически полной модели морской циркуляции высокого пространственного разрешения с прогностическим расчетом трехмерных полей течений, температуры и солености, и двумерных полей уровня моря и характеристик морского льда.

Для расчетов термогидродинамических и ледовых характеристик в Керченском проливе используется модель INMOM (Дианский, 2013; Moshonkin et al., 2018). Для акватории Керченского пролива модель INMOM реализована на области, включающей как Керченский пролив, так и акватории Черного и Азовского морей. Это сделано для того, чтобы учесть в полном объеме физические факторы водообмена между Черным и Азовским морями, которые определяют структуру и направление течений в Керченском проливе. Версия INMOM реализована в повернутой системе координат. Сеточная область модели получена путем переноса полюсов с помощью дробно-линейного преобразования Мебиуса в точки с координатами 36.158° в. д. 45.266° с. ш.

(около 4 км юго-западнее центра села Горностаевка на Крымском полуострове) для северного полюса и 37.135° в. д. 45.249° с. ш. (на южном берегу Ахтанизовского лимана, около 6 км севернее центра станицы Старотитаровская на Таманском полуострове) для южного полюса. Преобразование осуществлялось таким образом, чтобы экватор в модельной системе координат был симметричен по отношению к полюсам. Поскольку используется математически точная сферическая система координат, то никаких топологических искажений при расчете полей течений не вносится.

На рисунке 1 представлена используемая сеточная область, а также показана детализация области на акватории Керченского пролива. В модельной системе координат сеточная область составляет 720×296 узлов по долготе и широте, а шаг по пространству составляет 0.5° . На акватории Керченского пролива такое пространственное разрешение соответствует 150–200 м. С удалением от него разрешение ухудшается и на периферии Азовского моря оно составляет 2–3 км. На периферии Черного моря в районе побережья Болгарии разрешение еще более огрубляется до 10 км. Таким образом, для большей точности расчетов достигается сгущение сеточного разрешения модели именно в акватории Керченского пролива. Следует отметить, что расчет циркуляции в остальной части Черного и Азовского морей практически не оказывает влияние на быстродействие модели, так как основная вычислительная нагрузка ложится именно на расчетную область в Керченском проливе.

По вертикали используется 20 неравномерно заданных сигма-уровней.

Методология расчета течений в Керченском проливе с захватом заведомо большей области, чем занимает пролив, требуется для более точного расчета циркуляции в нужном районе, поскольку исчезает сложная, не решаемая точно, проблема задания граничных условий на жидких границах, что требовалось бы при использовании и реализации региональной модели Керченского пролива, так как течения в проливе определяются циркуляцией вод в Азовском и Черном морях. Следует отметить, что интенсивные течения в Керченском проливе могут формироваться за счет ветрового возбуждения длинных волн и сейшевых колебаний в Азовском море. А так как его акватория полностью входит в область расчета с достаточным пространственным разрешением, то эти волны будут воспроизводиться в соответствии с реальным атмосферным воздействием.

Более детально с параметрами модели можно познакомиться в (Дианский и др., 2020; Сенченко, 2022).

Расчет ледовых характеристик на акватории Керченского пролива проводится в модели INMOM с учетом термодинамики, динамики и реологии льда.

2.3. Модель ветрового волнения

Ветровое волнение является одним из определяющих факторов при ведении хозяйственной деятельности в море, проектировании и строительстве гидротехнических сооружений. На акватории Керченского пролива ветровое волнение формируется сочетанием ветрового волнения с акваторий Черного и Азовского морей.

В настоящей работе оно исследовалось с использованием модели РАВМ. Ее применение позволяет учитывать практически все 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.

В качестве исходных данных для РАВМ используются срочные поля ветра, рассчитанные по региональной модели атмосферы WRF. Также входными данными для модели являются следующие: распределение глубин, сведения о колебаниях уровня, приливных и других течениях, температуре воды и воздуха, сведения о ледовитости моря.

В настоящей работе модель ветрового волнения была реализована на нерегулярной сеточной области, соответствующей сеточной области модели морской циркуляции INMOM (рисунок 1), описание которой приведено ниже.

3. Верификация технологии расчета гидрометеорологических параметров Керченского пролива

Для верификации моделей атмосферной циркуляции WRF, морской циркуляции INMOM и ветро-волновой модели РАВМ в Керченском проливе использовались данные натурных измерений, полученные в рамках изысканий ФГБУ «ГОИН» при проведении экспедиционных исследований в мае–июле 2014 г. и ноябре 2014 г. с временной гидрометеорологической станцией (ГМС), расположенной на острове Тузла и трех автономных гидрологических донных станциях (АГДС) в Тузлинском створе. Положение ГМС и трех АГДС представлено на рисунке 2.

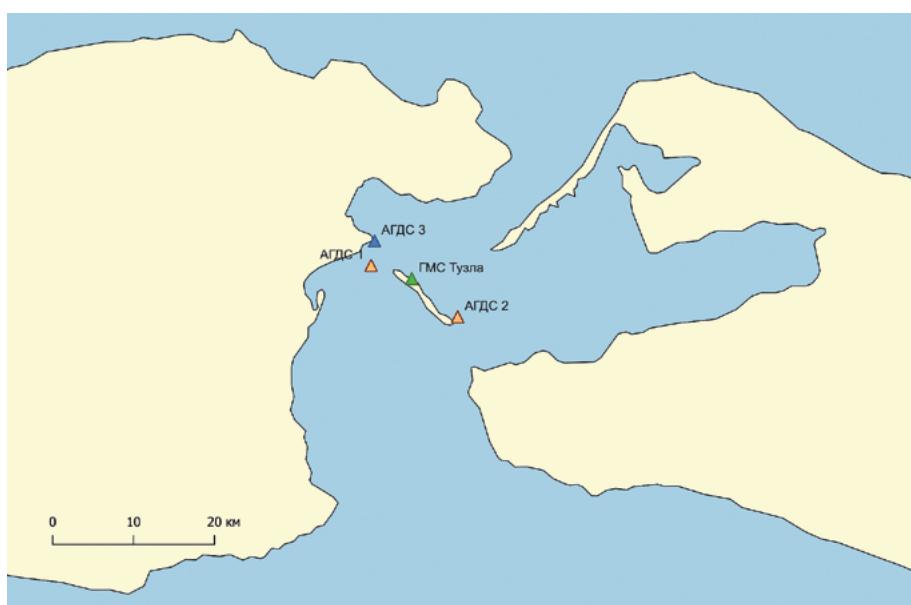


Рис. 2 – Расположение ГМС на острове Тузла и АГДС в Тузлинском створе

3.1. Верификация модели WRF

Верификация результатов по модели WRF проводилась по следующим характеристикам: скорость ветра, зональная и меридиональная компоненты скорости ветра, давление. Именно эти параметры определяют динамику течений, уровня моря и волнения в Керченском проливе. В качестве данных моделирования использовались результаты расчетов в точке сеточной области модели, расположенной максимально близко к метеостанции.

На рисунках 3 и 4 показано сравнение модельных данных с данными на ГМС «Тузла» (рисунок 2). Результаты верификации свидетельствуют о хорошем воспроизведении реальной синоптической ситуации с помощью модели WRF над акваторией Керченского пролива. Следует отметить, что в период 20-х чисел июня 2014 г. в районе Керченского пролива наблюдался шторм, который вполне адекватно воспроизведен в модели. Этот факт является важным с точки зрения адекватного воспроизведения экстремальных событий.

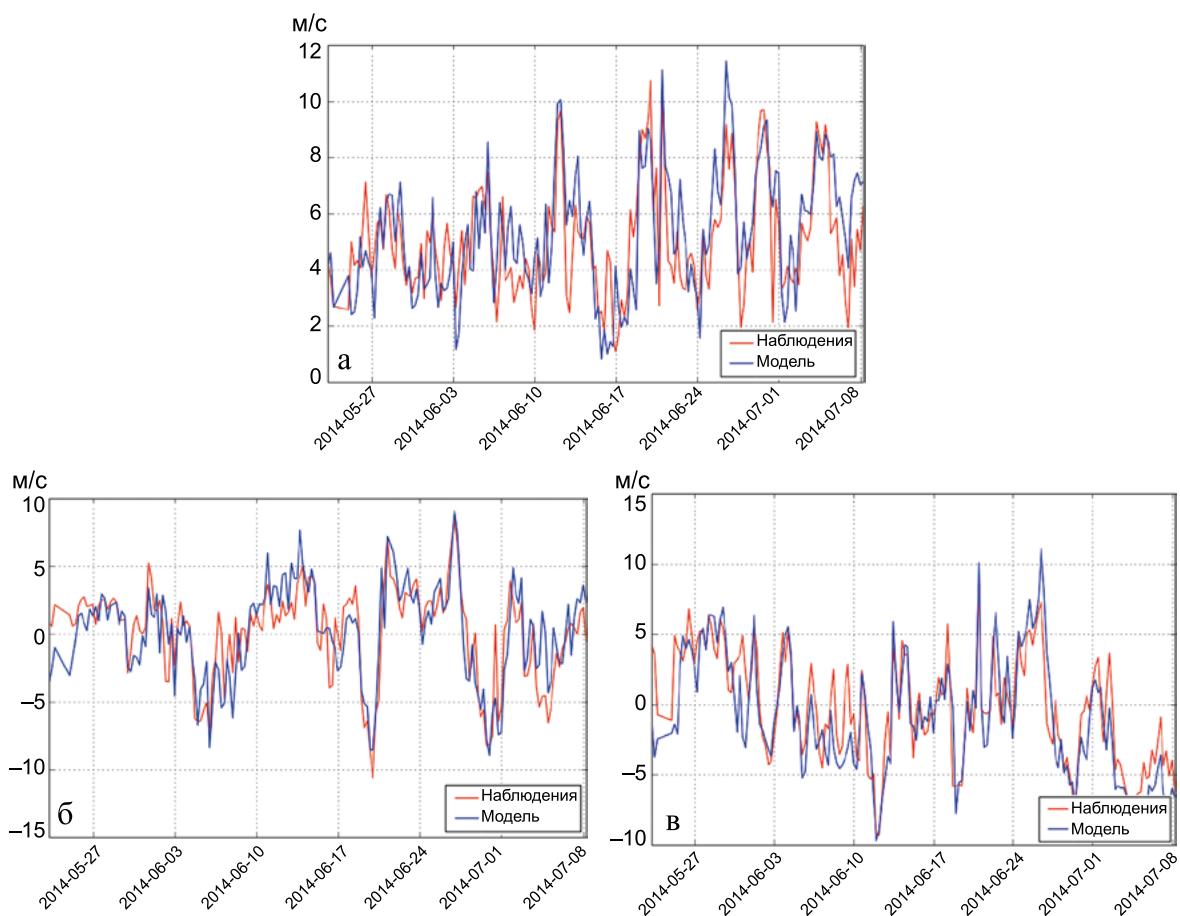


Рис. 3 – Модуль (а), зональная (б) и меридиональная (в) компоненты скорости ветра на высоте 10 м (в м/с) по результатам моделирования (синяя линия) и по данным измерений (красная линия) на временной ГМС «Тузла» (май–июль, 2014 г.)

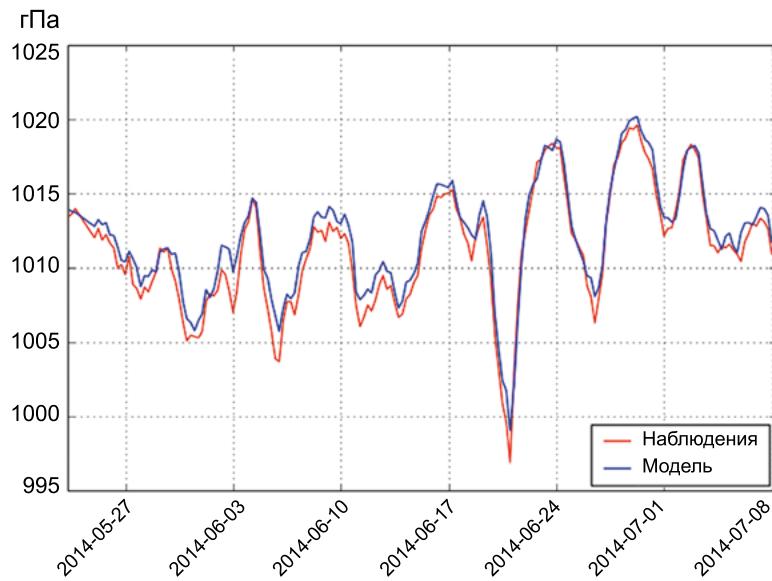


Рис. 4 – Давление над уровнем моря (гПа) по результатам моделирования (синяя линия) и по данным измерений (красная линия) на временной ГМС «Тузла» (май–июль, 2014 г.)

Для более объективной оценки верификации были рассчитаны статистические характеристики сравнения данных наблюдений и результатов моделирования (таблица 1). Давление воспроизводится с коэффициентом корреляции 0.99, так что его отражение моделью очень близко к наблюдаемым на метеостанции значениям. Коэффициенты корреляции для модуля скорости ветра составляют 0.73, а по компонентам скоростей для зональной компоненты – 0.83, а для меридиональной – 0.86, что является очень высоким показателем и свидетельствует о хорошем качестве воспроизведения моделью синоптической ситуации в данном регионе. Такие высокие коэффициенты корреляции означают хорошее совпадение модельных и наблюдаемых значений скорости ветра не только по величине, но и по направлению. Средняя абсолютная ошибка модуля скорости ветра по всем станциям не превышает 1.28 м/с. Значения коэффициента корреляции измеренных и модельных значений скорости ветра составляют 0.72 (по модулю).

Особое внимание в таблице 1 следует обратить на отношения СКО моделирования к СКО данных измерений. В среднем по станции эта величина для модуля скорости составляет 1.11 м/с, а для компонент зональной и меридиональной скорости – 1.03 м/с и 1.12 м/с, соответственно. Таким образом, моделируемая изменчивость скорости ветра не занижается, а, наоборот, немножко завышается. Это важно, например, при расчетах ветро-волновых нагрузок. Оправдываемость расчетов также высока, результаты воспроизведения ветра и давления на уровне моря с помощью модели WRF в сравнении с данными наблюдений на временных ГМС оцениваются на «отлично» (РД 52.27.759-2011).

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции, среднее и среднеквадратическое отклонение результатов моделирования скорости ветра (м/с) и данных измерений в Керченском проливе на временной ГМС «Тузла»
(результаты приведены для 6-ти часового осреднения, май–июль, 2014 г.)

Характеристика	Средняя абсолютная ошибка	Систематическая ошибка	Относительная ошибка	СКО результатов моделирования	СКО данных измерений	Отношение СКО моделирования к СКО измерений	Коэффициент корреляции	Оправдываемость, %
Модуль скорости ветра, м/с	1.29	-0.28	-0.18	1.97	2.18	1.11	0.72	97
Зональная компонента скорости ветра, м/с	1.68	-0.01	0.00	3.41	3.50	1.03	0.81	98
Меридиональная компонента скорости ветра, м/с	1.78	0.64	0.20	3.82	4.27	1.12	0.85	97
Давление на уровне моря, гПа	0.89	-0.81	-0.26	3.99	3.70	0.93	0.99	93

Таким образом, анализируя статистические характеристики сравнения данных наблюдений и результатов моделирования из таблицы 1 для ГМС «Тузла», с учетом того, что радиус Россби для атмосферы составляет порядка 100 км, можно заключить, что модель WRF хорошо воспроизводит реальные распределения ветра и давления и позволяет с достаточно высокой точностью воспроизводить метеорологические характеристики над регионом расположения мостового перехода.

3.2. Верификация модели INMOM

Верификация модели проводилась путем сравнения временных рядов уровня моря и скоростей течений с шагом по времени 6 часов по результатам расчета по модели INMOM в Керченском проливе для 2-х станций, АГДС1 и АГДС2 (рисунок 2) на период с мая по июль 2014 г. Для верификации ледовых характеристик сравнивались карты авиаразведки, проведенной в 1954 году (один из самых ледовых годов по данным наблюдений), и толщина льда, полученная за эти же сроки по расчету модели INMOM.

На рисунках 5–9 приведено сравнение временных рядов уровня моря и скоростей течений. Эти станции расположены на небольшом удалении от основных створов мостового перехода. Скорости течений, по данным измерений и по результатам моделирования, не сильно отличаются по глубине, их значения выше на приповерхностных горизонтах, чем на придонных, приблизительно на 10–15 %, учитывая малые глубины Керченского пролива и, следовательно, мест постановок АГДС.

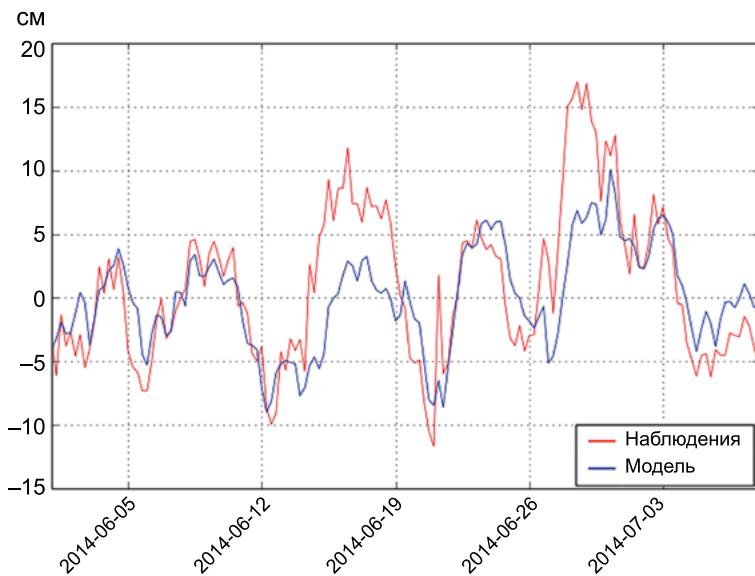


Рис. 5 – Уровень моря (см) по результатам моделирования (синяя кривая) и по данным измерения на АГДС 1 (красная кривая)

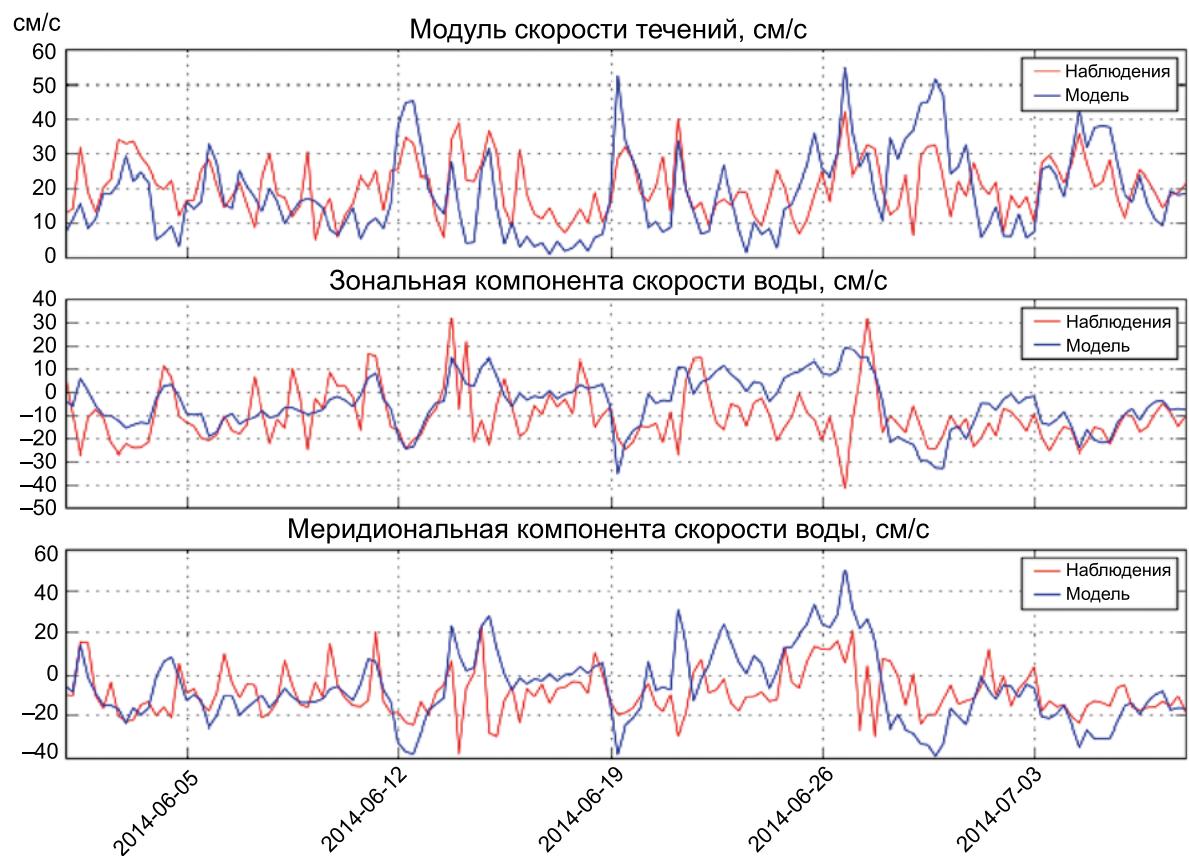


Рис. 6 – Модуль скорости течений, зональная и меридиональная компоненты скорости течений (см/с) по результатам моделирования (синяя кривая) и по данным измерений на АГДС 1 (красная кривая) на глубине 0.7 м

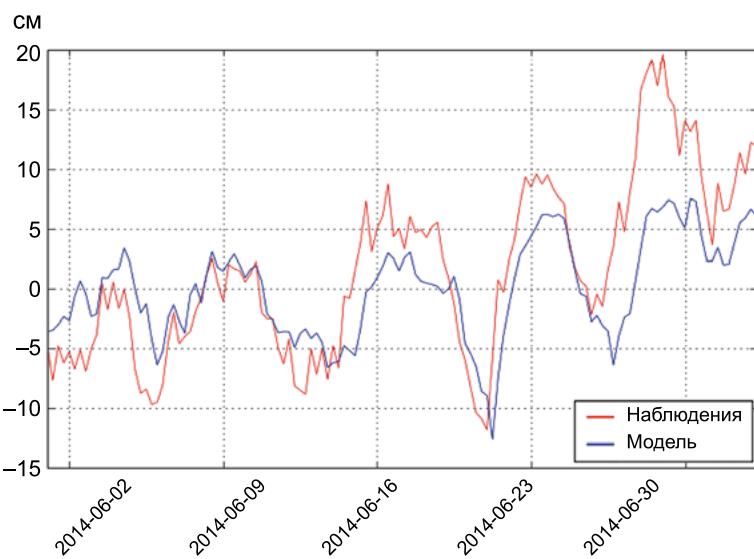


Рис. 7 – Уровень моря (см) по результатам моделирования (синяя кривая) и по данным измерения на АГДС 2 (красная кривая)

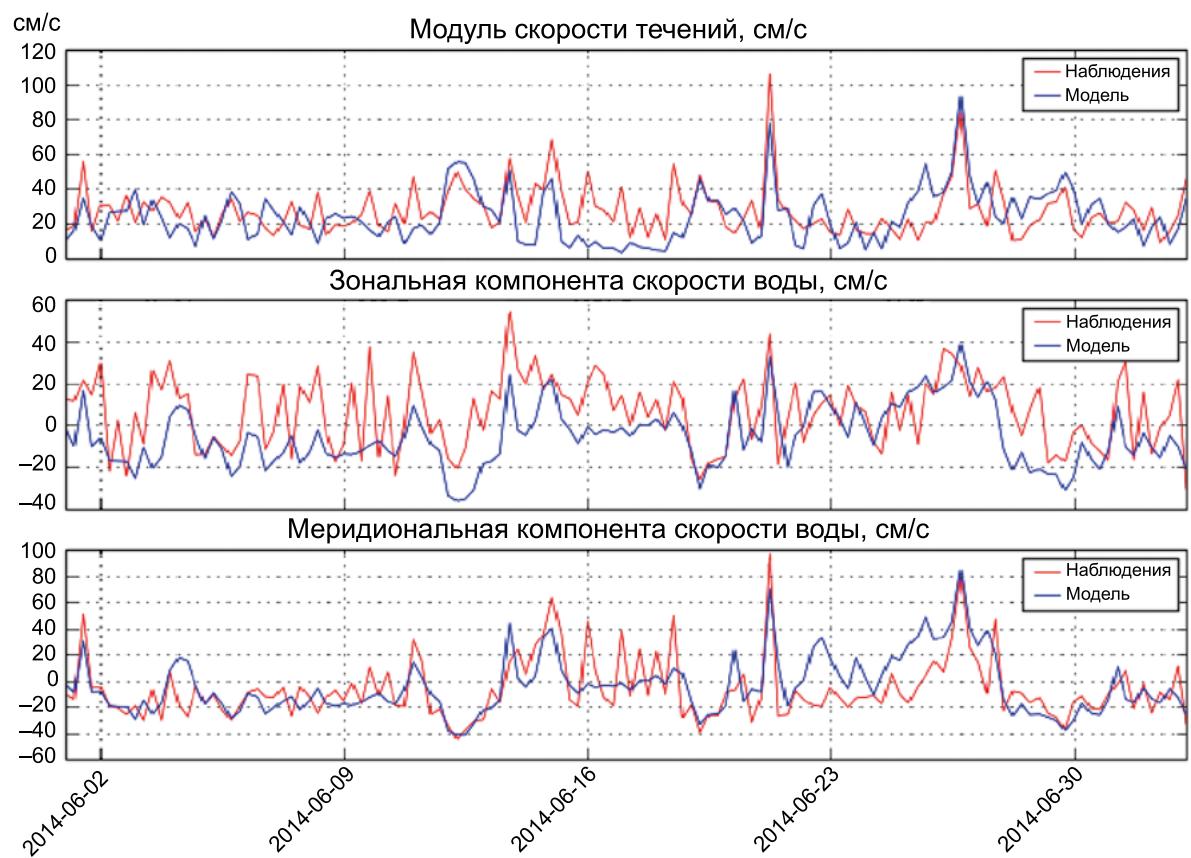


Рис. 8 – Модуль скорости течений, зональная и меридиональная компоненты скорости течений (см/с) по результатам моделирования (синяя кривая) и по данным измерений на АГДС 2 (красная кривая) на глубине 1.7 м

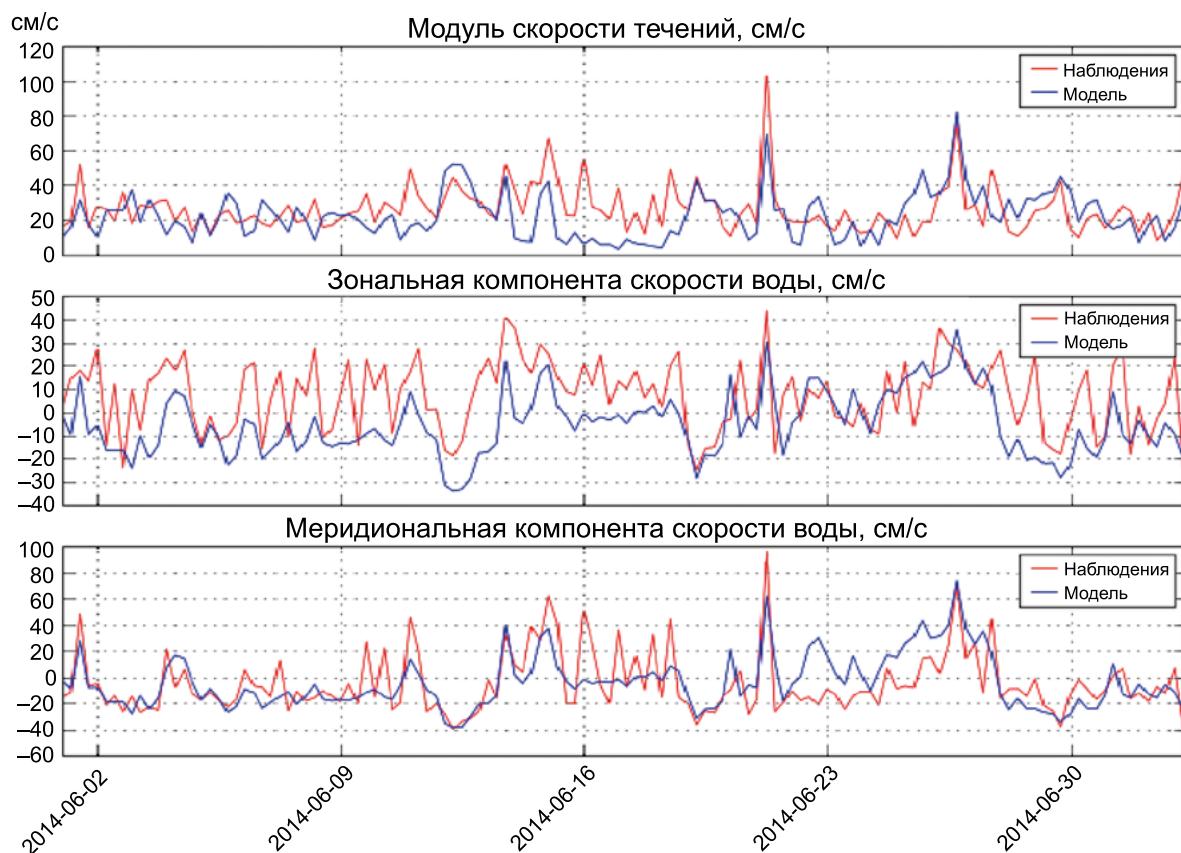


Рис. 9 – Модуль скорости течений, зональная и меридиональная компоненты скорости течений (см/с) по результатам моделирования (синяя кривая) и по данным измерений на АГДС 2 (красная кривая) на глубине 2.7 м

Сравнительный анализ результатов расчетов с измерениями показывает, что уровень моря воспроизводится несколько лучше, чем скорости течений. Это объясняется тем, что как давление на уровне моря, так и уровень моря, являются интегральными характеристиками, в которых складываются ошибки по высоте и глубине. Следует отметить, что уровень моря измеряется по давлению столба жидкости над АГДС и давлению атмосферы на уровне моря. Затем эти величины пересчитываются в изменение уровня моря. Для объективности сравнения именно этот уровень приводится как для данных наблюдений, так и для результатов моделирования. Обращают на себя внимание тренды в наблюдаемом уровне моря на АГДС2, которые несколько ухудшают корреляцию между наблюдаемыми и моделируемыми значениями. Очевидно, что это связано с ошибками наблюдений. Для АГДС2 известно, что в течение измерений она постепенно погружалась в мягкий илистый грунт и, тем самым, увеличивалась высота водяного столба, что и приводило к появлению тренда в измеряемом значении уровня моря.

Для более объективной оценки результатов верификации построены статистические характеристики сравнения данных наблюдений и результатов моделирования (таблица 2). По результатам проведенного анализа результатов верификации

получено хорошее соответствие результатов моделирования с данными измерений по скоростям течений и уровню моря. Для уровня моря коэффициент корреляции меняется, в целом, от 0.74 до 0.8, что является для современных моделей морской циркуляции в бесприливных морях довольно хорошим результатом.

Таблица 2 – Статистические характеристики сравнения результатов моделирования уровня и скорости течений по модели INMOM и данных измерений на АГДС1 и АГДС2 в Керченском проливе (результаты приведены для 6-ти часового осреднения)

Характеристика	Средняя абсолютная ошибка	Систематическая ошибка	Относительная ошибка	СКО результатов моделирования	СКО данных измерений	Отношение СКО моделирования к СКО измерений	Коэффициент корреляции
АГДС 1							
Уровень моря, см	3.13	0.95	0.19	5.97	3.97	0.66	0.74
Модуль скорости течений на глубине 0.7 м, см/с	8.31	1.82	0.28	7.96	12.09	1.52	0.54
Зональная компонента скорости течений на глубине 0.7 м, см/с	9.46	-3.11	-0.35	11.41	10.98	0.96	0.35
Меридиональная компонента скорости течений на глубине 0.7 м, см/с	11.52	-4.49	-0.48	11.77	16.8	1.43	0.44
АГДС 2							
Уровень моря, см	3.87	1.59	0.27	7.22	4.1	0.57	0.8
Модуль скорости течений на глубине 1.7 м, см/с	11.66	3.36	0.33	14.16	15.06	1.06	0.51
Зональная компонента скорости течений на глубине 1.7 м, см/с	15.23	11.74	0.8	17.26	14.61	0.85	0.55
Меридиональная компонента скорости течений на глубине 1.7 м, см/с	14.2	-2.19	-0.13	23.61	22.48	0.95	0.67
Модуль скорости течений на глубине 2.7 м, см/с	11.35	3.96	0.42	13.55	13.56	1.00	0.45
Зональная компонента скорости течений на глубине 2.7 м, см/с	15.09	12.19	0.94	15.38	13.61	0.89	0.52
Меридиональная компонента скорости течений на глубине 2.7 м, см/с	14.27	-0.61	-0.03	23.67	20.61	0.87	0.65

В скоростях также наблюдается неплохое соответствие, включая усиление значений скорости течений при возникновении штормовых ситуаций (шторм в 20-х числах июня 2014 г.). Совпадение по направлению и скорости течений (рисунки 6, 7, 9) по большей части выше, чем для модуля скорости. Анализ результатов показал, что в целом скорости течений воспроизводятся не только в приповерхностном слое, но и в глубинных слоях. При этом коэффициенты корреляции аналогичны полученным при сравнении скоростей модельных и измеренных течений на поверхности моря. Коэффициент корреляции для модуля скорости течений составляет 0.48–0.50, а по компонентам скоростей – 0.35–0.54 для зональной составляющей, 0.44–0.57 для меридиональной составляющей. Такие коэффициенты корреляции характеризуют довольно хорошее совпадение скорости течений не только по модулю, но и по направлению. Причем, покомпонентно течения воспроизводятся даже лучше, чем по модулю. В период шторма в Керченском проливе с 20 по 22 июня 2014 г. скорости течений на АГДС2 могли превышать 100.0 см/с. Следует отметить, что эта станция находится в узком проливе между дамбой и Тузлинской косой, где формируются интенсивные течения.

В таблице 2 особое внимание следует обратить на отношения СКО моделирования к СКО измерений. В среднем по данным с двух станций (на горизонте 0.7 м для АГДС1 и на горизонтах 1.7 м и 2.7 м для АГДС2) эта величина для модуля скорости составляет 1.19 м/с, а для компонентов зональной и меридиональной скорости 0.9 м/с и 1.08 м/с, соответственно. Таким образом, моделируемая изменчивость в скорости течений не занижается, а наоборот, немного завышается. Для уровня эта характеристика меньше и составляет 0.62. Согласно (РД 52.27.759-2011) результаты воспроизведения модуля скорости и уровня моря с помощью модели INMOM в сравнении с данными наблюдений на временных ГМС оцениваются на «отлично», а для компонентов течений по направлениям – на «хорошо».

Таким образом, анализируя статистические характеристики сравнения данных наблюдений и результатов моделирования по станциям, можно заключить, что полученные результаты с достаточно высокой точностью воспроизводят морскую циркуляцию в Керченском проливе и соответствуют современному уровню моделирования морской гидродинамики.

На рисунке 10 представлены средние за период проведения измерений (с конца мая по начало июля 2014 г.) рассчитанные поля скорости течений на поверхности и в придонном слое. Результаты расчета показывают хорошее соответствие приповерхностных скоростей со средним полем ветра. Следует отметить важный момент, касающийся придонных течений. В южной части Керченского пролива они направлены против ветра, из Черного моря. Этот факт подтверждает необходимость использования трехмерной модели течений даже при таких небольших глубинах, которые характерны для Керченского пролива.

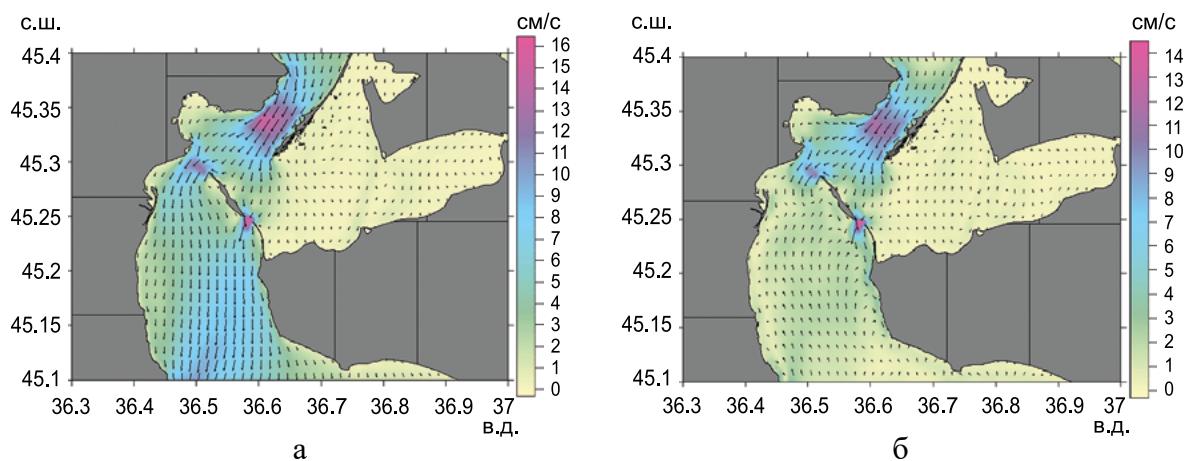


Рис. 10 – Осредненное поле скорости течений (см/с) на поверхности (а) и в придонном слое (б) на акватории Керченского пролива, полученное по результатам расчета по модели INMOM за период проведения измерений

Для оценки качества модели по воспроизведению ледовых условий были проведены расчеты по воспроизведению гидродинамических и ледовых характеристик для наиболее ледовитых годов. Сравнение результатов расчетов осуществлялось с материалами наблюдений за ледовой обстановкой в Керченском проливе с помощью авиаразведки, проведенной в 1954 году. Для этой задачи в качестве атмосферного воздействия были использованы данные базы метеоданных CORE (Large and Yeager, 2009), специально подловленные для расчетов по моделям морской циркуляции.

Атмосферные характеристики CORE включают в себя температуру воздуха, влажность и скорость ветра на высоте 10 м и атмосферного давления на уровне моря (временной интервал 6 ч); длинноволновую и коротковолновую радиации (временной интервал 24 ч); среднемесячные атмосферные осадки и сток рек. Пространственное разрешение полей этих атмосферных характеристик по долготе составляет 1.8750°. По широте же разрешение неравномерное.

Анализ данных приводной температуры воздуха в массивах атмосферного форсинга показал, что наблюдается существенное завышение средней температуры воздуха в зимний период этих расчетных данных по сравнению с данными береговых наблюдений с одной стороны. А с другой – имеется занижение колебаний температуры воздуха в зимний период этих расчетных данных по сравнению с данными береговых наблюдений. Все это приводило к занижению моделируемого количества морского льда. Поэтому используемые данные по температуре воздуха в акватории Керченского пролива были скорректированы по данным метеостанций ГМС Керчь, ГМС Опасное, ГМС Заветное, ГМС Тамань. Корректировка данных выполнялась по алгоритму, предложенному в работе (Terink et. al., 2009) по формуле:

$$T^* = \bar{T}_0 + \frac{\sigma(T_0)}{\sigma(T_m)} (T_u - \bar{T}_0) + (\bar{T}_0 - \bar{T}_m),$$

где T_u – температура по данным реанализа, T_0 – температура по станционным данным, T_m – средняя температура на акватории Керченского пролива по данным реанализа.

Средние значения \bar{T}_0 , \bar{T}_m определялись осреднением за 65 дней для каждого блока по 5 суток (30 суток до, 30 суток после).

Анализ результатов расчетов показал, что существенный вклад в формирование льда, а также в толщину льда, вносится переносом льда под действием ветра и течений. При преобладающем направлении ветра северных румбов происходит вынос и увеличение толщины льда из Азовского моря в Керченский пролив. Более того, адвективный перенос тепла зачастую приводит к образованию полыни. А это приводит тут же к дополнительному образованию морского льда. Таким образом, адвективный перенос льда способствует увеличению количества льда в Керченском проливе.

На рисунке 11 показана карта авиаразведки, проведенной в 1954 году, и толщина льда, рассчитанная с использованием модели INMOM за эти же сроки. Результаты расчета показывают качественное соответствие полученных данных расчета с данными наблюдений. Хорошо воспроизводится расположение кромки льда, а также области с максимальными толщинами льда.

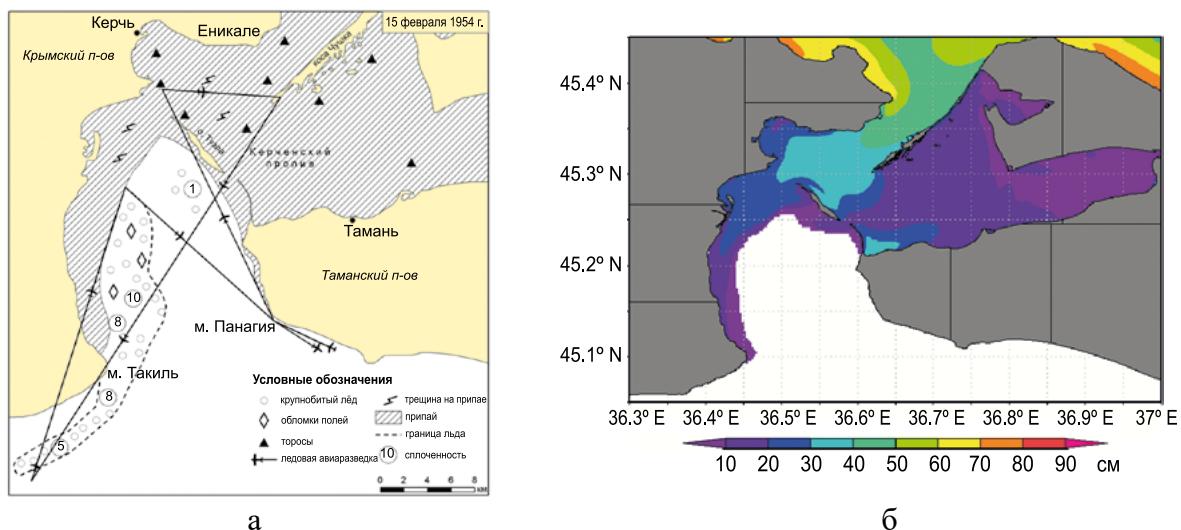


Рис. 11 – Ледовые характеристики на акватории Керченского пролива по данным авиаразведки (а) и по результатам численного моделирования (б) 15 февраля 1954 года

3.3 Верификация модели РАВМ

Для верификации расчетов ветрового волнения по модели РАВМ были использованы данные наблюдений, полученные на АГДСЗ с установленным волнографом (рисунок 2) на ноябрь 2014 г. Сравнение высот волн, полученных при помощи измерений и расчетов, приведено на рисунке 12.

Для получения количественных оценок сравнения расчетов и наблюдений были также вычислены две статистические характеристики: коэффициент корреляции и средняя ошибка расчетов. Для представленного на рисунке 12 сравнения коэффициент корреляции определялся стандартным методом и равнялся 0.98, а средняя ошибка расчетов (d_{xy}) равнялась 0.13 м.

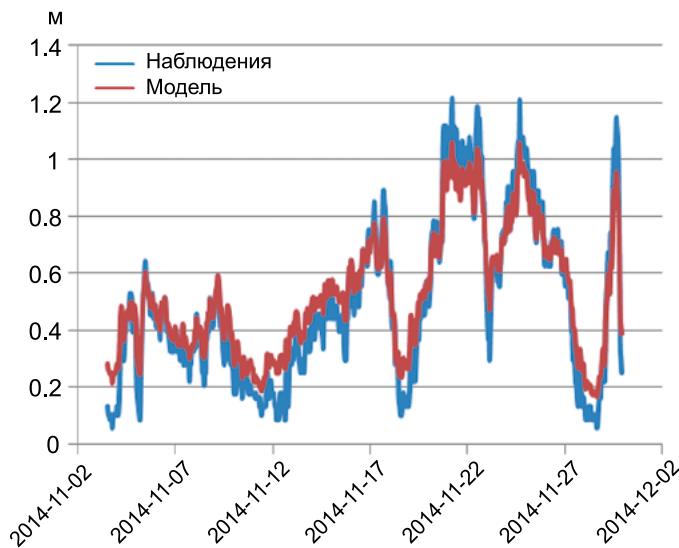


Рис. 12 – Сравнение высот волн (м), полученных при помощи измерений АГДС (ряд 1) и расчетов РАВМ (ряд 2)

По результатам сравнения можно утверждать, что расчеты для точки в открытых водах, в зоне преобладающих черноморских волн (АГДС3, рисунок 2), рассчитываются с хорошей точностью.

4. Выводы

Выполненное сравнение результатов расчетов гидрометеорологических характеристик по моделям INMOM, WRF и РАВМ, реализованным для акватории Керченского пролива и натурных данных, полученных в 2014 г. при проведении экспедиционных исследований в рамках изысканий ФГБУ «ГОИН», показала, что все сравниваемые характеристики воспроизводятся с достаточно высокой точностью и разработанная технология СМРП соответствуют современному уровню моделирования гидрометеорологических параметров.

Стоит отметить, что сравнение модельных и измеренных скоростей течений до сих пор остается фундаментальной проблемой океанографии, что можно связать с несколькими факторами. Изначально, в данные натурных наблюдений могут «пропадать» турбулентные пульсации различных масштабов, что может привносить в эти данные ошибки. В свою очередь, в модели морской циркуляции волновая составляющая и турбулентность учитываются опосредованно путем эмпирических параметризаций, что так же вносит ожидаемые ошибки при расчете. Также, модельные расчеты для сравнения с данными наблюдений с места постановки АГДС приходится осреднять в пределах ячейки расчетной сетки. В данном случае это 120–150 м, но все равно ожидать точного соответствия между модельными и наблюдаемыми значениями не приходится. Что касается атмосферных данных,ываемых в модели морской циркуляции, даже при применении общепринятых современных балк-формул

при расчете напряжения трения ветра следует учитывать возникающие ошибки, так как эти формулы являются эмпирическими и не могут отражать все особенности реального турбулентного взаимодействия атмосферы и океана с учетом ветрового волнения. Интересно отметить, что даже использование метеоданных грубого пространственного разрешения позволяет довольно успешно воспроизводить реальную картину ледовой обстановки в Керченском проливе. Это может говорить о том, что региональная циркуляция в Керченском проливе во многом определяется его конфигурацией и общей синоптической обстановкой над акваторией Черного и Азовского морей.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 21-17-00191 «Мониторинг водообмена через Керченский пролив на основе современных методов наблюдений и численного моделирования». Численные расчеты проведены на компьютере Межведомственном многопроцессорном суперкомпьютерном центре РАН (<http://www.jsc.ru/>).

Список литературы

1. Введенский А. Р., Дианский Н. А., Кабатченко И. М., Литвиненко Г. И., Резников М. В., Фомин В. В. Литодинамические процессы в зоне строительства моста через Керченский пролив // Вестник МГСУ. 2016. № 11. С. 78–91. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2016.11.78-91>.
2. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. В 2-х томах. Т. 2. М.: Мир, 1986. 415с.
3. Дианский Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
4. Дианский Н. А., Фомин В. В., Коршенко Е. А., Кабатченко И. М. Система морских ретроспективных расчетов и прогнозов гидрометеорологических характеристик Азовского моря и Керченского пролива // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2020. Т. 2. № 5. С. 131–140. <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2020-2-5-131-140>.
5. Дьяков Н. Н., Фомин В. В., Цвецинский А. С., Липченко А. Е., Лужин Д. В., Полозок А. А., Фомина И. Н., Тимошенко Т. Ю., Белогудов А. А., Левицкая О. В. Современные гидрометеорологические условия формирования ветро-волновых, ледовых и других опасных явлений в Керченском проливе. Росгидромет, Севастопольское отделение федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова». Севастополь, 2019. 365 с.
6. Инжебейкин Ю. И., Аксенов Д. С. Сезонная динамика гидрологии вод Керченского пролива до периода активного техногенного воздействия (по экспедиционным исследованиям ЮНЦ РАН 2005–2009 гг.) // Экологические исследования и экологический мониторинг. 2019. Т. 1. № 4. С. 171–179. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2019-1-4-171-179>.
7. 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.
8. РД 52.27.759-2011 Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов

9. Сытник Н. А. Гидрометеорологические условия в южной части Керченского пролива и предпроливной зоне Черного моря как потенциальном районе промышленного культивирования моллюсков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2020. № 4 (208). С. 112–117. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-4-112-117>.
10. Сенченко В. Г., Григорьев А. В., Фомин В. В., Кубряков А. И., Дианский Н. А., Кабатченко И. М. Гидрометеорологическое обеспечение для автономного судовождения в порту // Морские информационно-управляющие системы. 2022. № 1 (21). С. 70–81.
11. Bagnold R. A. Mechanics of the marine sedimentation. M. N. Hill (editor) // The Sea. 1963. Vol. 3. P. 507–528.
12. Kubryakov A. A. and Stanichny S. V. Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 97. P. 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.12.002>.
13. Large W. and Yeager S. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set // Clim Dyn. 2009. Vol. 33. P. 341–364. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0441-3>.
14. Moshonkin S., Zalesny V., Gusev A. Simulation of the Arctic – North Atlantic Ocean Circulation with a Two-Equation K-Omega Turbulence Parameterization // J. of Marine Science and Engineering. 2018. Vol. 6. No. 3. 95. <https://doi.org/10.3390/jmse6030095>.
15. Sadighrad E., Fach B. A., Arkin S. S., Salihoglu B., Hüsrevoglu Y. S. Mesoscale eddies in the Black Sea: Characteristics and kinematic properties in a high-resolution ocean model // Journal of Marine Systems. 2021. Vol. 223. 103613. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103613>.
16. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D., Duda M. G., Huang X., Wang W., Powers J. G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR) // University Corporation for Atmospheric Research. 2008. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>.
17. Terink W., Hurkmans R. T. W. L., Torfs P. J. J. F., Uijlenhoet R. Bias correction of temperature and precipitation data for regional climate model application to the Rhine basin // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 2009. Vol. 6. P. 5377–5413. <https://doi.org/10.5194/hessd-6-5377-2009>.

Статья поступила в редакцию 08.11.2022, одобрена к печати 22.12.2022.

Для цитирования: Фомин В. В., Коршленко Е. А., Кабатченко И. М., Гусев А. В., Дианский Н. А. Воспроизведение гидрометеорологических условий Керченского пролива Часть 1: Верификация технологии // Океанологические исследования. 2022. № 50 (4). С. 50–72. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(4\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(4).3).

**REPRODUCTION OF HYDROMETEOROLOGICAL
CONDITIONS OF THE KERCH STRAIT.
PART 1: TECHNOLOGY VERIFICATION**

**V. V. Fomin^{1,2}, E. A. Korshenko¹, I. M. Kabatchenko^{1,3},
A. V. Gusev^{1,2,4}, N. A. Diansky^{1,2,5}**

*¹N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet,
6, Kropotkinskiy Lane, Moscow, 119034, Russia,
e-mail: kekapon@gmail.com;*

*²Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences,
8, Gubkina Street, Moscow, 119333, Russia;*

*³Moscow Institute of Physics and Technology,
9, Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia;
⁴Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,*

*36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia;
⁵M. V. Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia*

The first part of the paper presents verification results of the technology developed at the Federal State Budgetary Institution “N. N. Zubov State Oceanographic Institute” (FSBI “SOI”) – Marine Hindcast and Forecasts System (MHFS) adapted for the Kerch Strait. It represents the complex of numerical 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. This technology was used to support the design and construction of the bridge across the Kerch Strait. The capabilities of reproduction of the hydrological characteristics required for practical purposes are demonstrated by verification of model results with observational data. It is supposed to use the presented technology of calculation of hydrometeorological parameters of Kerch Strait for the monitoring system developed within the framework of the Russian Science Foundation research project 21-17-00191 “Monitoring of water exchange through the Kerch Strait on the basis of modern methods of observations and numerical modeling”. The second part will present the regime characteristics of hydrological conditions in the Kerch Strait water area.

Keywords: numerical modeling, the Kerch Strait, hydrometeorological characteristics

Acknowledgement: This research was funded by the Russian Science Foundation, research project 21-17-00191. Numerical calculations were performed using supercomputer resources of the Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences.

References

1. Bagnold, R. A., 1963: Mechanics of the marine sedimentation. M. N. Hill (editor). *The Sea*, **3**, 507–528.
2. Diansky, N. A., 2013: *Modelirovanie cirkulyacii okeana i issledovanie ego reakcii na korotkoperiodnye i dolgoperiodnye atmosfernye vozdejstviya (Modeling ocean circulation and studying its response to short-term and long-term atmospheric impacts)*. Fizmatlit, 272 p.

3. Diansky, N. A., V. V. Fomin, E. A. Korshenko, and I. M. Kabatchenko, 2020: Sistema morskikh retrospektivnyh raschetov i prognozov gidrometeorologicheskikh harakteristik Azovskogo morya i Kerchenskogo proliva (Hindcast and operational forecasting system of hydrometeorological characteristics for the Sea of Azov and Kerch Strait). *Ekologiya. Ekonomika. Informatika*. Seriya: Geoinformacionnye tekhnologii i kosmicheskij monitoring, **2** (5), 131–140.
4. Dyakov, N. N., V. V. Fomin, A. S. Cvecinsky, A. E. Lipchenko, D. V. Lukin, A. A. Polozok, I. N. Fomina, T. Y. Timoshenko, A. A. Belogudov, and O. V. Levickaya, 2019: *Sovremennye gidrometeorologicheskie usloviya formirovaniya vetro-volnovykh, ledovykh i drugih opasnykh yavlenij v Kerchenskom prolige* (Modern hydrometeorological conditions for the formation of wind-wave, ice and other dangerous phenomena in the Kerch Strait). Sevastopol, 365 p.
5. Inzhebeikin, Yu. I. and D. S. Aksenov, 2019: Sezonnaya dinamika gidrologii vod Kerchenskogo proliva do perioda aktivnogo tekhnogenного vozdejstviya (po ekspedicionnym issledovaniyam YUNC RAN 2005–2009 gg.) (Seasonal variability of hydrology of the Kerch Strait waters before the period active anthropogenic impact). *Ekologicheskie issledovaniya i ekologicheskij monitoring*, **1** (4), 171–179.
6. Gill, A., 1986: *Dinamika atmosfery i okeana (Atmosphere-Ocean dynamics)*. Moscow, Mir, 415 p.
7. Kabatchenko, I. M., G. V. Matushevsky, M. V. Reznikov, and M. M. Zaslavsky, 2001: Modelirovanie vетra i voln pri vtorichnyh termicheskikh ciklonah na CHernom more (Modeling of wind and waves during secondary thermal cyclones in the Black Sea). *Meteorologiya i gidrologiya*, **5**, 61–71.
8. Kubryakov, A. A. and S. V. Stanichny, 2015: Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **97**, 80–91, <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.12.002>.
9. Large, W. and S. Yeager, 2009: The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. *Clim Dyn.*, **33**, 341–364, <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0441-3>.
10. Moshonkin, S., V. Zalesny, and A. Gusev, 2018: Simulation of the Arctic – North Atlantic Ocean Circulation with a Two-Equation K-Omega Turbulence Parameterization. *J. of Marine Science and Engineering*, **6** (3), 95, <https://doi.org/10.3390/jmse6030095>.
11. RD 52.27.759-2011 *Nastavlenie po sluzhbe prognozov*. Razdel 3. CHast' III. Sluzhba morskikh gidrometeorologicheskikh prognozov.
12. Sadighrad, E., B. A. Fach, S. S. Arkin, B. Salihoglu, and Y. S. Hüsrevoglu, 2021: Mesoscale eddies in the Black Sea: Characteristics and kinematic properties in a high-resolution ocean model. *Journal of Marine Systems*, **223**, 103613, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103613>.
13. Senchenko, V. G., A. V. Grigoriev, V. V. Fomin, A. I. Kubryakov, N. A. Diansky, and I. M. Kabatchenko, 2022: Gidrometeorologicheskoe obespechenie dlya avtonomnogo sudovozhdeniya v portu (Hydrometeorological support for autonomous navigation in the port). *Morskie informacionno-upravlyayushchie sistemy*, **1** (21), 70–81.
14. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). *University Corporation for Atmospheric Research*, <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>.
15. Sytnik, N. A., 2020: Gidrometeorologicheskie usloviya v yuzhnoj chasti Kerchenskogo proliva i predprolivnoj zone CHernogo morya kak potencial'nom rajone promyshlennogo kul'tivirovaniya mollyuskov (Hydrometeorological conditions in the southern part of the Kerch Strait and the pre-strait zone of the Black Sea as a potential area for industrial shellfish cultivation). *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region*. Seriya: Estestvennye nauki, **4** (208), 112–117.

16. Terink, W., R. T. W. L. Hurkmans, P. J. J. F. Torfs, and R. Uijlenhoet, 2009: Bias correction of temperature and precipitation data for regional climate model application to the Rhine basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, **6**, 5377–5413, <https://doi.org/10.5194/hessd-6-5377-2009>.
17. Vvedenskiy, A. R., N. A. Dianskiy, I. M. Kabatchenko, G. I. Litvinenko, M. V. Reznikov, and V. V. Fomin, 2016: Litodinamicheskie processy v zone stroitel'stva mosta cherez Kerchenskij proliv (Lithodynamic processes in the construction area of a bridge across the Kerch Strait). *Vestnik MGSU*, **11**, 78–91.

Submitted 08.11.2022, accepted 22.12.2022.

For citation: Fomin, V. V., E. A. Korshenko, I. M. Kabatchenko, A. V. Gusev, N. A. Diansky, 2022: Reproduction of hydrometeorological conditions of the Kerch Strait. Part 1: Technology verification. *Journal of oceanological research*, **50** (4), 50–72, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(4\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(4).3).