

УДК 551.465

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ПРОГНОЗА МОРСКИХ ПОЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ АССИМИЛЯЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2025 г. Г. К. Коротаев, А. И. Мизюк*

ФИЦ “Морской гидрофизический институт РАН”, Капитанская ул., 2, Севастополь, 299011 Россия

*e-mail: artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 13.07.2024 г.

После доработки 21.01.2025 г.

Принята к публикации 05.03.2025 г.

Статья посвящена обсуждению идей Г.И. Марчука, которые стимулировали исследования в области оперативной океанографии и прогнозирования состояния морской среды в последние 10–12 лет в институтах Российской академии наук и Росгидромета. Описывается развитая сотрудниками Морского гидрофизического института и исследовательскими коллективами Франции методология в реконструкции температуры и солёности морской воды по данным наблюдений с ИСЗ. Демонстрируются применение простейшего алгоритма ассимиляции наблюдений, основанного на релаксации решения численной модели прогноза к восстановленным по спутниковым данным трехмерным термохалинным полям в Азово-Черноморском, Арктическом бассейнах и в Мировом океане. Оценки среднеквадратичных отклонений термохалинных полей Мирового океана, рассчитанных с применением простейшего алгоритма ассимиляции наблюдений, сопоставляются с аналогичными оценками продуктов системы CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) на основе GLO12 v2 и v4. Обсуждаются причины относительно небольших расхождений оценок анализов термохалинных полей, основанных на модели с пространственным разрешением 0.25° и использованием простейшего алгоритма ассимиляции наблюдений и модели GLO12 v2 и v4 с разрешением $1/12^\circ$ и значительно более сложным алгоритмом ассимиляцией наблюдений.

Ключевые слова: оперативный морской прогноз, ассимиляция данных, численное моделирование циркуляции океана, NEMO, Мировой океан

DOI: 10.31857/S0002351525030079

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие океанологических исследований в Советском Союзе, а затем и в России проходило в значительной степени под влиянием идей академика Г.И. Марчука. С его именем связано расширение исследований в области численного моделирования циркуляции океана, разработка эффективных численных алгоритмов решения уравнений морской динамики, использование сопряженных уравнений для выделения источников загрязнения, развитие методов вариационного анализа и ассимиляции наблюдений в геофизической гидродинамике. На основе полученных фундаментальных результатов Г.И. Марчуком была разработана методология непрерывного мониторинга океана на основе со-

четания моделирования и наблюдений, которая стала основой программы “Разрезы” [Марчук и др., 1984]. Эта методология оказала косвенное влияние на бурное развитие океанологических исследований в 1990–2000-е гг. Как отмечалось в докладе Р. Стюарта в Галифаксе на заключительной сессии крупномасштабного океанологического эксперимента WOCE (World Ocean Circulation Experiment), после анонса программы “Разрезы” в качестве международного проекта, Госдеп предложил крупнейшим океанологам США подготовить еще более широкомасштабную программу международных исследований, результаты которой легли бы в основу качественно новых представлений об океанической циркуляции и способствовали технологической модернизации океанологических исследований.

Такой программой стал крупномасштабный океанологический эксперимент WOCE. На основе эксперимента WOCE существенно развились спутниковые наблюдения топографии морской поверхности (с помощью высокоточных альтиметров), температуры поверхности океана (ТПО), характеристик ледяного покрова, а также измерения температуры и солёности моря буями-профилемерами, наблюдения ТПО и скорости течений и/или профилей температуры в приповерхностном слое моря с помощью поверхностных дрейфующих буев. Была отработана технология ретрансляции наблюдений через ИСЗ в центры обработки и их оперативного распространения заинтересованным пользователям. С начала 2000-х годов на этих основах построена современная глобальная оперативная система мониторинга океана, что дало толчок развитию оперативных систем морского анализа и прогноза, аналогичных метеорологическим прогнозам погоды. Таким образом, можно заключить, что современное лицо оперативная океанография обрела в значительной степени благодаря Г.И. Марчуку.

Модели циркуляции океана и методы ассимиляции данных наблюдений, использовавшиеся в Морском гидрофизическом институте при работе по программе “Разрезы”, будучи доведены затем до требуемого уровня устойчивости расчетов [Марчук, 1974; Марчук и др., 1987; Демышев и др., 1992; Кныш и др., 1980; Knysh et al., 1996], при проведении исследований в рамках проектов Европейской комиссии “MyOcean” 1, 2 легли в основу Черноморского центра оперативных морских прогнозов полей бассейна [Korotaev et al., 2011]. Познакомившись с возможностями черноморского центра МГИ и понимая специфику Черного моря как бассейна океанического типа [Марчук, 1970; Марчук и др., 1975], Г.И. Марчук предложил подготовить совместный российско-украинский проект для развития систем оперативных прогнозов на основе новых результатов в области численного моделирования циркуляции океана и методов ассимиляции наблюдений и создания национальных систем прогнозов полей Мирового океана. В Программу фундаментальных исследований Президиума РАН “Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология” был включен совместный проект РАН и НАНУ “Черное море как имитационная

модель океана” [Marchuk and Paton, 2012; Марчук и др., 2013]. В процессе работ по этому проекту апробировали ряд новых современных технологий проведения оперативных наблюдений и подготовлены модели для прогнозирования состояния морской среды на основе ассимиляции доступных наблюдений, позволяющие воспроизводить синоптическую изменчивость морских бассейнов [Залесный и др., 2013; Агошков и др., 2013; Гусев и Дианский, 2014; Мошонкин и др., 2014]. К сожалению, взаимодействие РАН и НАНУ прекратилось в 2014 г. в силу сложившихся политических условий, что не позволило завершить проект в полном объеме. Однако в 2016–2020 гг. при поддержке РНФ удалось реализовать крупный проект “Новые методы и суперкомпьютерные технологии анализа и прогноза Мирового океана и Арктического бассейна” с участием МГИ РАН, ИВМ РАН, ИО РАН и ГОИН, который обеспечил развитие идей Г.И. Марчука, изложенных в [Marchuk and Paton, 2012; Марчук и др., 2013]. По итогам работ по проекту РНФ создана технология анализа и прогноза полей Мирового океана, и макет системы оперативного прогноза на основе отечественных моделей INMIO (Institute of Numerical Mathematics and Institute of Oceanology) [Ибраев, 2019; Кауркин и др., 2016; Кауркин и др., 2018; Kalmykov et al., 2019] и INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [Алексеев и др., 1993; Zalesny et al., 2010; Moshonkin et al., 2011; Дианский, 2013; Гусев и Дианский, 2014], а также модели NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) [Мизюк и др., 2016; Мизюк и Коротаев, 2020], позволяющий с точностью, близкой к лучшим мировым стандартам, воспроизводить поля течений, температуры и солёности морской воды в Мировом океане, Арктическом и Азово-Черноморском бассейнах соответственно. Усилиями коллектива разработчиков из МГИ, ИО РАН и ГОИН в дальнейшем на основе макета создан опытный образец системы морских прогнозов полей Мирового океана и Арктического бассейна [Коротаев и др., 2022]. Кроме того, модуль оперативного прогноза океанических полей Арктики в разных конфигурациях развернут в ГОИН, а в МГИ модуль оперативных прогнозов полей Азово-Черноморского бассейна на основе NEMO дополнен прогностической системой для Мирового океана.

При реализации технологий анализа и прогноза полей Мирового океана использовались разные подходы к ассимиляции наблюдений, включая метод ансамблевой оптимальной интерполяции [Кауркин и др., 2016; Кауркин и др., 2018], а в дальнейшем и ансамблевого фильтра Калмана [Фомин и др., 2021]. Также анализировалась простейшая схема ассимиляции наблюдений, основанная на релаксации решения к реконструированным по спутниковым данным трехмерным полям температуры и солёности морской воды [Коротаев и др., 2010; Коротаев и др., 2015].

В дальнейшем изложении представлены результаты анализов и прогнозов полей Азово-Черноморского бассейна, Арктики и Мирового океана, полученные на основе использования простейшей релаксационной схемы ассимиляции наблюдений и обсуждаются источники погрешностей. Во втором разделе обсуждаются алгоритмы реконструкции трехмерных полей океана на основе спутниковых наблюдений и простейшая схема ассимиляции этих наблюдений. В третьем разделе приводятся некоторые результаты анализа, прогноза и реанализа полей Черного моря, Мирового океана в целом и Арктического бассейна на основе ассимиляции реконструированных трехмерных полей температуры и солёности морской воды. В заключении обсуждаются источники погрешностей при прогнозе состояния морей и океанов, а также перспективы развития отечественных региональных систем морских прогнозов.

2. РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В течение последних 10–15 лет в работах [Коротаев и др., 2010; Коротаев и др., 2015] для Черного моря и [Guinehut et al., 2012] для Мирового океана замечено, что отклонения температуры и солёности морской воды от некоторого базового состояния (“невозмущенного состояния” Черного моря и климатического среднего для Мирового океана) хорошо коррелируют с аномалиями топографии морской поверхности на глубинах ниже сезонного термоклина для температуры морской воды и на всех глубинах для солёности. Следовательно, альтиметрические наблюдения позволяют реконструировать сначала отклонение температуры или солёности

морской воды от базового состояния, а затем, добавляя базовые значения, и полный профиль температуры и солёности морской воды в заданный момент времени на любой заданной сетке и на выбранных априори горизонтах. В работах [Guinehut et al., 2012; Лишаев и др., 2019] также показано, что привлечение спутниковых наблюдений ТПО позволяет восстанавливать профили температуры во всем слое от поверхности до дна бассейна. Мотивом для развития алгоритма реконструкции трехмерных полей температуры и солёности морской воды как для Черного моря, так и для Мирового океана явилось то обстоятельство, что относительно редкие зондирования буями-профилемерами не дают возможности воспроизводить синоптическую изменчивость полей морского бассейна, тогда как альтиметрия и ТПО характеризуют синоптические процессы, но только на поверхности моря.

Совместный анализ данных контактных наблюдений и альтиметрии в Черном море заключается в следующем. Первоначально формируется массив совместных наблюдений температуры и солёности морской воды и альтиметрии в глубоководной части Черного моря, ограниченной 500-метровой изобатой. Для этого на картах динамической топографии поверхности моря уровня обработки L4, доступных на сайтах центров обработки альтиметрии (AVISO, проект MuOcean или CMEMS после 2016 г.), выделяются области на поверхности моря, лежащие между целочисленными значениями изолиний уровня с шагом 1 см. Затем, каждый измеренный буюм-профилемером профиль температуры и солёности морской воды относится к градации уровня моря, соответствующей точке зондирования. Для каждой градации уровня моря профили температуры и солёности накапливаются в течение определенного срока и затем усредняются. Среди всех профилей, соответствующих различным значениям альтиметрического уровня моря, выделяются профили температуры и солёности, соответствующие окрестности нулевого значения уровня моря (т.е. лежащие в диапазоне от -1 до $+1$ см), которые далее называются “невозмущенными”. Считается, что невозмущенные профили температуры и солёности определяют базовую стратификацию бассейна, которая деформируется синоптической и сезонной изменчивостью. Затем вычисляется

разница глубин залегания изохалин и изотерм, определенных по профилям температуры и солёности для каждой градации альтиметрического уровня моря и для базовой стратификации. В итоге устанавливается зависимость смещения изотермических и изохалинных поверхностей на каждой глубине от величины альтиметрического динамического уровня моря, что дает возможность восстанавливать трехмерное поле солёности моря на всех глубинах, а трехмерное поле температуры — ниже сезонного термоклина, на те моменты времени, для которых имеется карта альтиметрического динамического уровня моря. Привлечение спутниковых наблюдений температуры поверхности моря позволяет реконструировать трехмерное поле температуры и в поверхностных слоях моря.

Задача реконструкции трехмерных полей температуры и солёности вод Мирового океана на основе спутниковых наблюдений ТПО и альтиметрического уровня решалась с использованием методов корреляционного анализа на основе использования исторических данных наблюдений [Guinehut et al., 2012]. В качестве базового поля использовался климатический массив, описывающий сезонный ход полей температуры и солёности морской воды. В каждой точке наблюдений сначала рассчитывались отклонения температуры и солёности морской воды от климатических значений, отклонения ТПО от климата, а также отклонения динамической высоты относительно глубины 1500 м относительно аналогичной динамической высоты, рассчитанной на основе климатологии. Затем находились коэффициенты регрессии между отклонениями температуры на каждом горизонте в зависимости от отклонений динамической топографии и температуры поверхности океана. Для солёности морской воды строилась регрессия между отклонениями солёности от климатических значений и отклонениями динамической высоты. Коэффициенты регрессии рассчитывались на одноградусной сетке по всей акватории Мирового океана. Выборка для расчета коэффициентов регрессии набиралась в сферическом прямоугольнике с размером в 5° вдоль широты и переменным размером вдоль долготы. Затем вычисленные коэффициенты регрессии применялись для расчета профилей температуры и солёности морской воды непосредственно по спутниковым наблюдениям.

Для проведения вычислений альтиметрический спутниковый уровень подвергался дополнительной обработке, чтобы соответствовать аномалиям динамической высоты, рассчитанным по данным гидрологических зондирований. Детали применяемых процедур можно найти в [Guinehut et al., 2012]. На основе общего подхода, представленного в [Guinehut et al., 2012], разработана технология подготовки трехмерного массива полей температуры и солёности ARMOR [Verbrugge et al., 2017], который является одним из оперативных продуктов CMEMS.

В Морском гидрофизическом институте на основе описанных выше результатов работ по восстановлению термохалинной структуры Черного моря и технологии подготовки массива ARMOR создана собственная версия технологии реконструкции трехмерных полей температуры и солёности Мирового океана по измерениям с ИСЗ [Белокопытов, Жук, 2024]. Так же, как и в [Guinehut et al., 2012], восстановления полей температуры и солёности океана по данным дистанционных наблюдений проводилось на основе регрессионной модели. В отличие от [Guinehut et al., 2012], при расчете профилей $T_r(x, y, z, t)$ и $S_r(x, y, z, t)$ по регрессионной модели не предполагалась несмещенность оценок и использовались следующие соотношения:

$$\begin{aligned} T_r(x, y, z, t) &= T_0(x, y, z) + \alpha(x, y, z, t)SLA'(x, y, t) + \\ &+ \beta(x, y, z, t)SST'(x, y, t) + T_{clim}(x, y, z, t), \\ S_r(x, y, z, t) &= S_0(x, y, z) + \gamma(x, y, z, t)SLA'(x, y, t) + \\ &+ S_{clim}(x, y, z, t), \end{aligned}$$

где t — время, x, y, z — пространственные координаты, SLA' — аномалия уровня океана, SST' — аномалия температуры поверхности океана, T_{clim}, S_{clim} — климатические значения температуры и солёности морской воды.

Регрессионные коэффициенты α, β и γ определялись так же, как и в [Guinehut et al., 2012], соотношениями:

$$\alpha(z) = \frac{Cov(SST', SST')Cov(SLA', T'(z)) - Cov(SLA', SST')Cov(SST', T'(z))}{Cov(SLA', SLA')Cov(SST', SST') - Cov(SLA', SST')^2}$$

$$\beta(z) = \frac{\text{Cov}(SLA', SLA') \text{Cov}(SST', T'(z)) - \text{Cov}(SLA', SST') \text{Cov}(SLA', T'(z))}{\text{Cov}(SLA', SLA') \text{Cov}(SST', SST') - \text{Cov}(SLA', SST')^2}$$

$$\gamma(z) = \frac{\text{Cov}(SLA', S'(z))}{\text{Cov}(SLA', SLA')}$$

а

$$T_0(x, y, z) = \overline{T'(x, y, z, t)} - \alpha(x, y, z) \overline{SLA'(x, y, t)} - \beta(x, y, z) \overline{SST'(x, y, t)},$$

$$S_0(x, y, z) = \overline{S'(x, y, z, t)} - \gamma(x, y, z) \overline{SLA'(x, y, t)}.$$

Расчеты аномалий температуры, солёности морской воды и уровня поверхности, а также ковариаций и средних значений аномалий, проводились следующим образом. Значения $T'(z)$ и $S'(z)$ рассчитывались по данным буев АРГО относительно сезонного хода климатического массива WOA18, построенного на основе гидрологических наблюдений за период 2005–2017 гг. Для расчета SLA' использовались данные спутниковых альтиметров L4. Значения SLA' рассчитывались относительно среднего сезонного хода SLA за тот же период 2005–2017 гг. Для расчета SST' использовались данные спутниковых радиометров ESA SST CCI OSTIA L4. Значения SST' находились относительно среднего сезонного хода SST также построенного за период 2015–2019 гг. Выборка для расчета ковариаций накапливалась за 2015–2019 гг. в областях с найденным оптимальным радиусом влияния $R = 1^\circ$ с центрами в узлах географической сетки 0.25° . Таким образом, в результате рассчитаны коэффициенты регрессии и значения T_0 , S_0 , что в итоге позволяет реконструировать трехмерные поля температуры и солёности морской воды по данным спутниковых наблюдений на сетке 0.25° по всему Мировому океану на любой временной интервал.

Реконструированные различными алгоритмами трехмерные массивы температуры и солёности морской воды дают довольно близкие результаты с точки зрения воспроизведения из-

менчивости полей океана. На разных глубинах основного пикноклина они учитывают около 40% дисперсии естественных флуктуаций температуры или солёности морской воды.

3. ПРОГНОЗЫ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ И МИРОВОГО ОКЕАНА НА ОСНОВЕ АССИМИЛЯЦИИ РЕКОНСТРУИРОВАННЫХ ПОЛЕЙ

Использование продуктов службы мониторинга оперативного мониторинга морской среды CMEMS, которая предоставляет обработанные наблюдения с ИСЗ в режиме времени близком к реальному, дает возможность реконструкции трехмерной структуры термохалинных полей морей и океанов как в он-лайн, так и в офф-лайн режимах. Поскольку имеется возможность формировать реконструированные поля в узлах регулярной сетки, то можно использовать простейшие алгоритмы их ассимиляции для расширения понимания возникновения ошибок в анализах, прогнозах и реанализах, которые возникают при применении более сложных схем усвоения наблюдений.

В Морском гидрофизическом институте по итогам исследований в рамках проекта РНФ “Новые методы и суперкомпьютерные технологии анализа и прогноза Мирового океана и Арктического бассейна” проведена модернизация действующей системы морских прогнозов с целью расширения возможностей исследований океанических процессов как в региональном, так и глобальном аспекте. Существовавшая ранее региональная конфигурация системы прогнозов полей Черного моря [Коротаев и др., 2016] расширена для выполнения расчетов гидрофизических полей в бассейнах Черного, Азовского и Мраморного морей. Ядром новой версии региональной системы морских прогнозов является комплекс численного моделирования динамики океана NEMO [Madec et al., 2016], позволяющий воспроизводить динамику и тренды гидрофизических параметров в морях Эвксинского каскада (Азовское, Черное и Мраморное моря) [Мизюк и др., 2019]. Региональная конфигурация для выполнения расчетов гидрофизических полей в бассейнах Эвксинского каскада на основе модели NEMO в разных модификациях используется как для расчета текущих анализов и прогнозов в бассейне, так и при проведении реанализов.

В качестве ядра подсистемы прогноза циркуляции в Азово-Черноморском бассейне используется версия модели с разрешением 4.6 км. Для параметризации турбулентного перемешивания в моделях используется $k-\epsilon$ замыкание, обеспечивающее удовлетворительное воспроизведение характеристик холодного промежуточного слоя (ХПС). В Азовском море и в северной части Черного моря подключен модуль расчета ледяных полей. На основе прогностических расчетов показана адекватность воспроизведения стратификации, крупномасштабной циркуляции и синоптической изменчивости Черного моря [Мизюк и др., 2019]. Разработанный алгоритм включения в модель проливов адекватно воспроизводит изменчивости водообмена Черного с Азовским и Мраморным морями [Мизюк и др., 2019; Мизюк и Коротаев, 2024].

Модель циркуляции Черного моря усваивает спутниковые данные об уровне моря и температуре поверхности. Усвоение спутниковой температуры поверхности моря основана на процедуре коррекции потока тепла. Ассимиляция спутниковой альтиметрии при расчете анализов и прогнозов основана на процедуре оптимальной интерполяции [Коротаев и др., 2016].

После аварии на Каховской ГЭС оперативная модель прогнозов циркуляции Черного моря использовалась для оценки распространения загрязнений на шельфе. На рис. 1 приведены результаты расчета распространения загрязнений, а также спутниковое изображение видимого диапазона на 25 июня 2023 г. Сопоставление расчетной и наблюдаемой картин показывает, что

система дает возможность обеспечивать достоверной информацией потенциальных потребителей.

При проведении реанализов на основе комплекса численного моделирования динамики океана NEMO использовалась упрощенная схема ассимиляции, основанная на релаксации решения модели к реконструированным по спутниковым наблюдениям трехмерным термохалинным полям Черного моря, описанным в предыдущем разделе. Для расчета реконструированных полей использовалась база данных наблюдений, включающая объединенный массив профилей температуры и солёности в акватории Черного моря из массивов EasyCora службы CMEMS за 1999–2021 гг. [https://data.marine.copernicus.eu/product/INSITU_BLK_PHYBG-CWAV_DISCRETE_MYNRT_013_03] и океанографический массив SeaDataNet (Европейской инфраструктуры управления океанскими и морскими данными) (<https://www.seadatanet.org/>) за 1999–2008 гг., а также данные спутниковых альтиметрических измерений уровня морской поверхности и спутниковой температуры поверхности Черного моря уровня обработки L4, предоставляемые службой морских прогнозов CMEMS (<https://doi.org/10.48670/moi-00141>). Восстановление трехмерных полей температуры и солёности моря в модели осуществляется на базе процедуры совместного анализа аномалий альтиметрического уровня и профилей температуры и солёности, представленной в работе [Коротаев и др., 2015]. Ассимиляция данных наблюдений выполнялась посредством релакса-

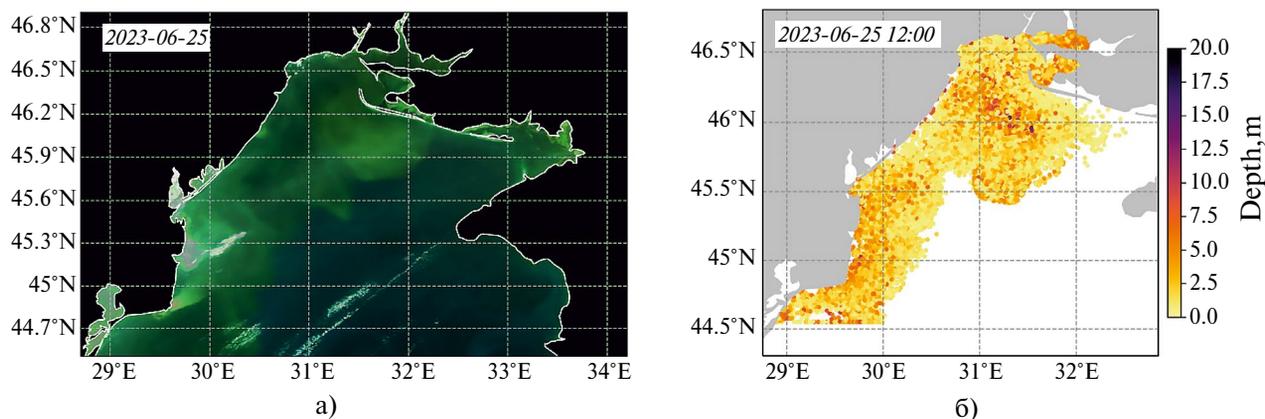


Рис. 1. Распространение загрязнений после аварии на Каховской ГЭС: растворенное органическое вещество по спутниковым данным MODIS/Aqua в видимом диапазоне (а); результаты численного моделирования распространения пассивной примеси с помощью лагранжевой модели по скоростям течений на основе результатов черноморского центра прогнозов (б)

ции модельных полей температуры и солености к реконструированным трехмерным массивам температуры и солености морской воды. Кроме того осуществлялось усвоение спутниковой температуры поверхности моря с использованием процедуры коррекции потока тепла [Коротаев и др., 2024].

Атмосферное воздействие при проведении расчетов задается по данным реанализа ERA5 [<https://cds.climate.copernicus.eu/>] Центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), имеющего пространственное разрешение 0.25° и временное разрешение 1 ч, что может быть весьма важно для воспроизведения короткопериодных внутрисуточных процессов. Используются поля температуры и влажности воздуха на высоте 2 м, компонент горизонтальной скорости ветра на высоте 10 м, потоки нисходящего длинноволнового и коротковолнового излучения, суммарные осадки и осадки в твердой фазе. Согласно балк-формулам протокола CORE (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments) [Large, Yeager, 2004] отмеченные метеопараметры с исходной дискретностью по времени используются для расчета суммарных потоков тепла, массы и напряжения трения ветра. Формирование льда в Азовском море учитывается косвенно посредством коррекции граничных условий: при достижении водами верхнего слоя температуры замерзания ставится условие отсутствия потока тепла на поверхности [Мизюк и др., 2019].

В региональной конфигурации, используемой при проведении реанализа, учитываются климатические расходы 16 рек в акватории Азово-Черноморского бассейна. В Азовском море по данным наблюдений задается объемный сток рек Дон и Кубань по данным из [База данных, 2012], что позволяет учесть реальные изменения водного баланса моря во времени и воспроизводить изменчивость водообмена в Керченском проливе.

Для учета водообмена через Босфор в модели частично включено Мраморное море и на выходе из пролива западнее острова Мармара задаются граничные условия на открытой жидкой границе. Для этого используются значения уровня моря, баротропных и бароклинических скоростей течений, температуры и солености, полученные на основе продуктов глобальной системы реанализа CMEMS [http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_

[csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024](#)].

Реанализ термохалинных полей Черного моря с релаксацией к реконструированным трехмерным полям температуры и солености вод Черного моря выполнен за 2000 — 2020 гг. и сопоставлялся с продуктом BLKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_004 морской службы CMEMS, содержащим реанализ среднесуточных полей океана для бассейна Черного моря с 01 января 1993 г. по 30 июня 2021 г. Результаты сопоставлений приведены в работе [Коротаев и др., 2024]. Отметим, что несмотря на то, что в реанализе CMEMS использовалась более сложная процедура ассимиляции наблюдений 3D-var, наблюдается хорошее соответствие эволюции средней температурной стратификации бассейна в течение 20 лет по двум расчетам.

На рис. 2 представлены диаграммы изменений во времени средней по горизонтальным сечениям температуры морской воды верхнего слоя моря в глубоководной (с глубинами более 500 м) части моря по результатам двух реанализов за 2019–2020 гг. Видно хорошее соответствие распределений температуры с глубиной и во времени, рассчитанных на основе релаксацией к реконструированным трехмерным полям температуры и солености и с использованием алгоритма ассимиляции 3D-var, где усваивались вдольтрековые аномалии уровня морской поверхности и *in situ* измерения вертикальных профилей температуры и солености из наборов данных SeaDataNet и CMEMS.

На рис. 2 представлена более детальная иллюстрацию отмеченного в работе [Коротаев и др., 2024] исчезновения в 2020 г. традиционного вентилируемого ХПС, обусловленного поступлением поверхностных вод в период зимней конвекции, что произошло впервые за всю историю океанографических наблюдений.

Упрощенный алгоритм усвоения наблюдений посредством релаксации решения к реконструированным трехмерным полям температуры и солености морской воды был также апробирован в ГОИН для анализа и прогноза термогидродинамики Арктического бассейна. Для проведения расчетов использовалась подготовленная в рамках проекта РНФ «Новые методы и суперкомпьютерные технологии анализа и прогноза Мирового океана и Арктического бас-

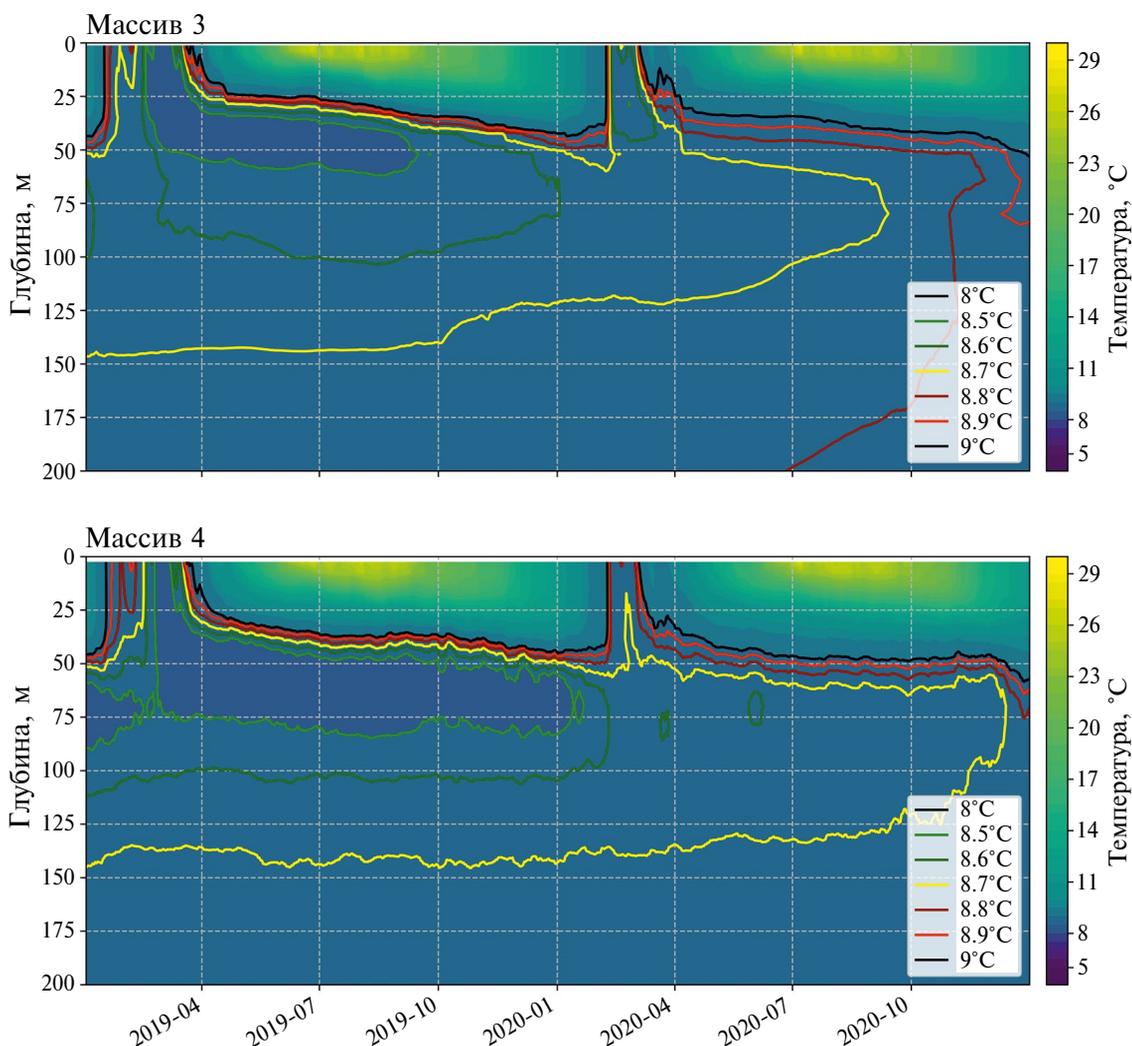


Рис. 2. Диаграммы изменений во времени средней по горизонтальным сечениям температуры морской воды в глубоководной части моря по результатам двух реанализов на основе конфигураций NEMO за 2019–2020 гг. Верхняя панель — реанализ на основе релаксации к реконструированным трехмерным полям температуры и солености вод Черного моря, нижняя панель — реанализ CMEMS

сейна” региональная модель Северного Ледовитого океана на основе INMOM, использующей σ -координату. Область интегрирования выбрана в трансформированной сферической системе координат, полюсы которой расположены на 60° в.д. и 120° з.д. географического экватора, что обеспечивает квазиравномерное разрешение на рассматриваемой акватории с шагом около 3.7 км. Модель включает несколько типов параметризаций вертикального турбулентного обмена: параметризации Пакановского-Филандера, Мони́на-Обухова, Меллора-Ямады, а также параметризацию турбулентного обмена на основе замыкания $k-\epsilon$. Для расчета характеристик морского льда используется встроенная в INMOM

модель динамики-термодинамики морского льда, а также модель CICE6.1 в качестве внешнего модуля. К модели подключен также ряд ассимиляционных алгоритмов, включая процедуры вариационной ассимиляции поверхностной температуры и характеристик, описывающих сплоченность и массу морского льда в рамках 4D-var технологии, а также процедуру последовательной ассимиляции границ ледяного покрова.

Достигнутая на мировом уровне точность анализов и прогнозов в Арктике заметно ниже, чем в Мировом океане, в силу отсутствия достаточного количества оперативных наблюдений в районах, покрытых льдом, а также ввиду

уменьшения значения радиуса деформации Россби в высоких широтах. Тем не менее использование упрощенного алгоритма усвоения наблюдений позволяет воспроизводить основные черты структуры вод Арктического бассейна. На рис. 3 в качестве примера приведено распределение приповерхностной температуры океана в расчетной области модели. На карте видны фронты, связанные с распространением теплых вод Атлантики в высокие широты. Отчетливо выделяется область пониженных температур, связанная с льдообразованием в Северном Ледовитом океане.

На рис. 4 приведена аналогичная карта распределения солёности приповерхностного слоя океана. На карте видны области распреснения вод, связанные с расходом рек и затоком соленых вод через Берингов пролив.

Отметим, что модель INMOM в расчетах с ассимиляцией на основе релаксации к реконструированным трехмерным полям температуры и солёности реалистично воспроизводит также распространение теплых и соленых вод Атлантики и в глубинных слоях Баренцева моря. Сопоставление оценок точности анализов полей температуры и солёности INMOM в расчетах с релаксацией к реконструированным трехмер-

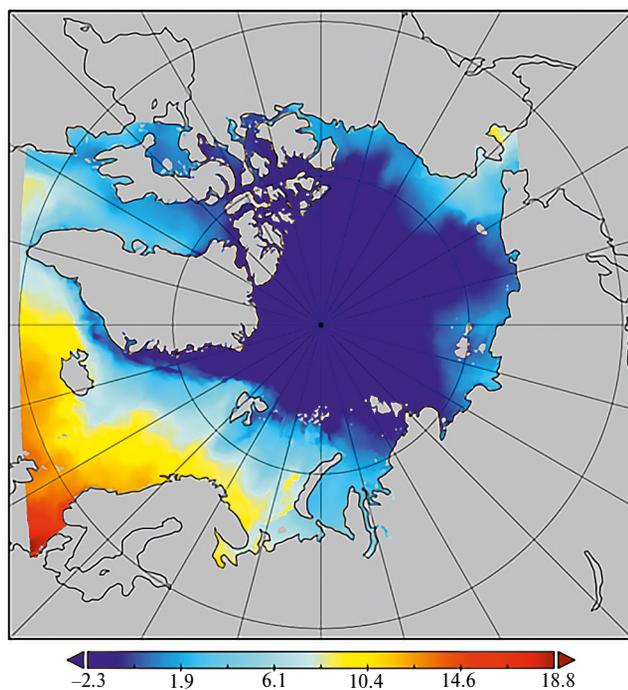


Рис. 3. Приповерхностная температура воды в расчетной области модели ($^{\circ}\text{C}$), 1 октября 2023 г.

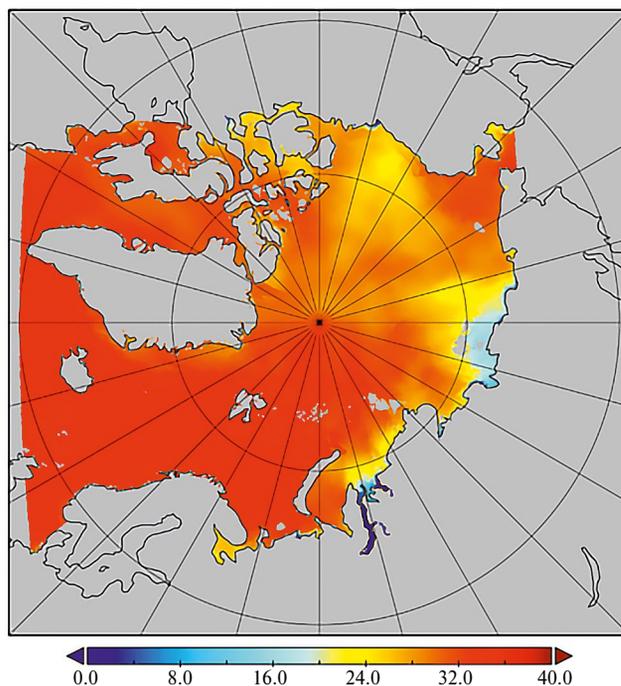


Рис. 4. Приповерхностная солёность воды (шпс), 1 октября 2023 г.

ным термохалинным полям с аналогичными оценками, полученными в подсистеме Арктика службы CMEMS дает сопоставимые точности продуктов двух систем.

Успешное применение простейшей схемы ассимиляции посредством релаксации к трехмерным массивам температуры и солёности в региональных системах прогнозов явилось основанием для использования аналогичного подхода при развитии в МГИ исследовательской версии системы прогноза Мирового океана. Модель циркуляции океана на основе комплекса NEMO версии 3.6, реализованная на основе задела, созданного в процессе исследований по проекту РФ “Новые методы и суперкомпьютерные технологии анализа и прогноза Мирового океана и Арктического бассейна”, апробирована в прогностических расчетах, а затем включена в качестве отдельного модуля в систему океанических прогнозов МГИ. Модель Мирового океана, как и в Азово-Черноморском бассейне, реализована на базе комплекса численного моделирования динамики океана NEMO [Madec et al., 2016]. Параметры и входные данные глобальной конфигурации основаны на находящемся в открытом доступе данных отчета [Grieco, 2015]. Модель циркуляции имеет разрешение около 0.25° в экваториальной и тропической части, а в северных

широтах доходит до 8–12 км. Гидродинамический блок модельного комплекса, как и для региональной конфигурации, основан на системе примитивных уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска, гидростатики инесжимаемой жидкости. Атмосферное воздействие для ее работы получено по результатам работы системы GFS [URL: <https://nomads.ncep.noaa.gov/>]. Для этого используются поля температуры и влажности воздуха на высоте 2 м, компоненты горизонтальной скорости ветра на высоте 10 м, потоки нисходящего длинноволнового и коротковолнового излучения, суммарные осадки и осадки в твердой фазе. В расчетах учитываются среднесезонные ежемесячные величины речного и прибрежного стока 99 крупнейших речных систем мира. В модель включена простейшая схема ассимиляции наблюдений, основанная на релаксации решения к рассчитываемым ежедневным реконструированным трехмерным полям температуры и солёности морской воды. Диагноз и прогноз гидрофизических параметров Мирового океана, представленных ниже, проведен пока на относительно короткий срок с января 2022 г. по сентябрь 2023 г.

На рис. 5, 6 приведены примеры продуктов, производимых системой. На рисунках видно, что модель качественно верно воспроизводит характерные особенности крупномасштабной циркуляции океана и его изменчивости. В частности, на рис. 5 хорошо выделяется фронтальная зона Гольфстрима и Северо-Атлантического течения. В поле солёности также видны прояв-

ления крупномасштабных океанических круговоротов. За счет распространения распресненных вод Амазонки в поле солёности выделяется область Межпассатного противотечения.

На рис. 6, где представлено распределение температуры поверхности в тропической зоне Тихого океана, видны особенности экваториальной динамики. В частности, хорошо представлено распространение языка холодных вод вдоль экватора и развитие волнообразных колебаний на фронтальных разделах.

Представляет интерес сопоставление точностей анализа, рассчитанного в МГИ, с данными по точности продуктов CMEMS. Для сопоставления использовалась информация из двух версий отчета CMEMS, где представлены данные относительно валидации продуктов анализов и прогнозов полей Мирового океана (<https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf>).

Валидированные продукты основаны на работе системы GLO12v4, ядром которой является NEMO версии 3.6. В основе конфигурации лежит триполярная сетка ORCA12 [Madec et al., 1996] с горизонтальным разрешением 9 км на экваторе, 7 км в окрестности мыса Гаттерас и 2 км в морях Росса и Уэдделла. Расчетная сетка по вертикали включает 50 горизонтов с разрешением от 1 м у поверхности океана до 450 м у дна, причем на верхний 100-метровый слой приходится 22 горизонта. В модели усваиваются альтиметрические вдольтрековые наблюдения и ТПО (уровень обработки L3), а также концентрация льда (уровень обработки L4). Наблюдения ус-

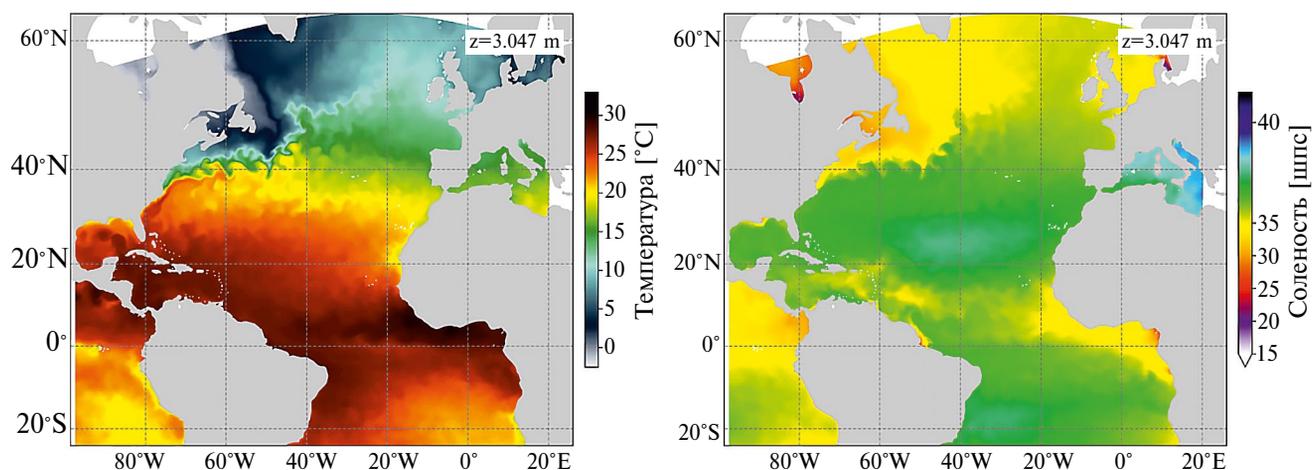


Рис. 5. Температура (°C) (слева) и солёность (шпс) (справа) поверхности Атлантического океана

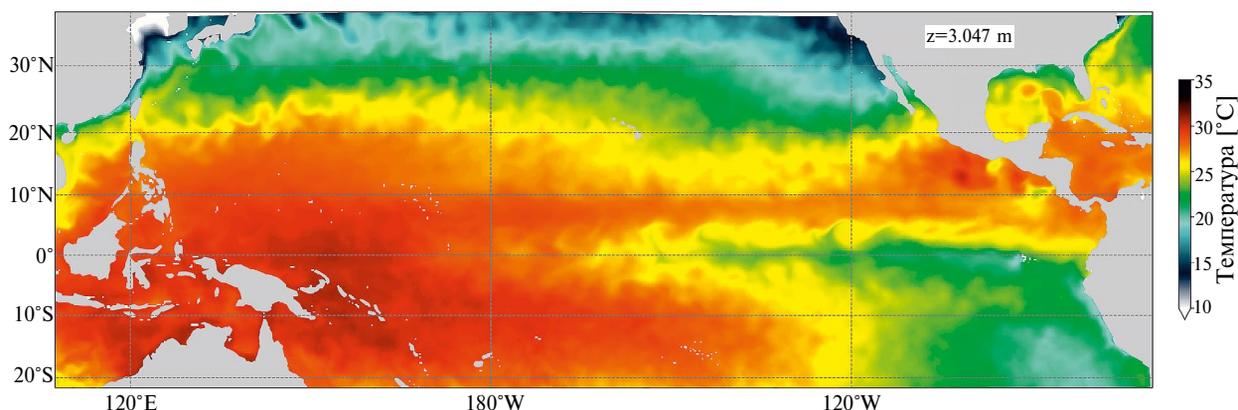


Рис. 6. Температура ($^{\circ}\text{C}$) поверхности тропической зоны Тихого океана

ваиваются на основе использования редуцированного фильтра Калмана SEEK [Brasseur et al., 2006] с семидневным ассимиляционным циклом. Больше деталей относительно валидации продукта GLO12v4 можно найти на странице <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf>.

Представление о точности реконструкции трехмерной структуры вод океана по спутниковым данным дает рис. 7, поскольку в систему прогнозов МГИ инкорпорирована простейшая схема ассимиляции данных посредством релаксации решения к реконструированным полям температуры и солёности морской воды, по процедуре из раздела 2 [Белокопытов и Жук, 2024]. Рисунок демонстрирует оценки среднеквадратичной погрешности анализов системы МГИ

и CMEMS на основе двух версий GLO12. Отметим еще раз, что модель циркуляции океана МГИ имеет разрешение 0.25° , а GLO12 — $1/12^{\circ}$. Кроме того, в системе GLO12 используется значительно более сложный алгоритм усвоения наблюдений.

Тем не менее погрешности анализов в этих системах оказываются довольно близкими. Наиболее впечатляющими являются низкие погрешности в воспроизведении поля солёности в системе МГИ в сравнении с обеими версиями GLO12. Качество воспроизведения поля температуры в системе МГИ удовлетворительно в сравнении с системой GLO12v2. Более продвинутая версия GLO12v4 дает заметное улучшение точности анализов только в приповерхностном слое. Отметим также, что продукты CMEMS представлены апостериорно улучшенными анализами (hindcast),

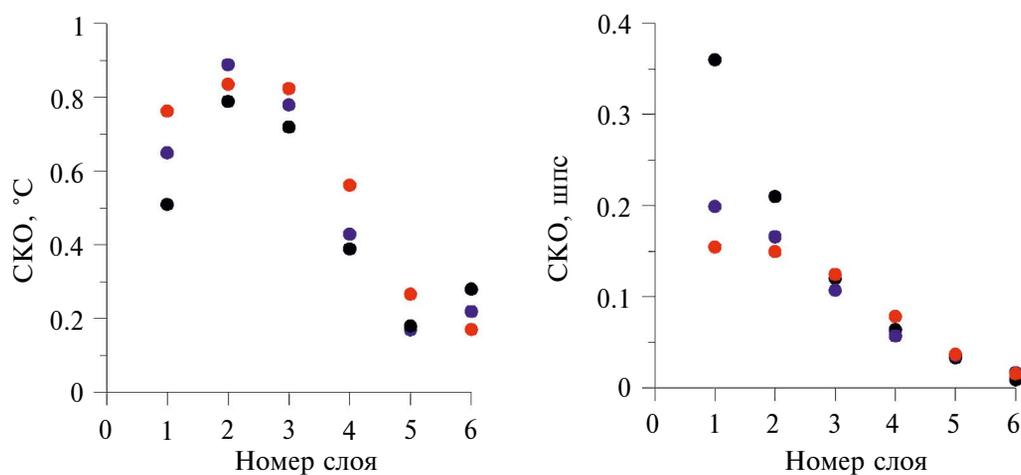


Рис. 7. Оценки среднеквадратичной погрешности продуктов системы МГИ (красные точки) и продуктов CMEMS на основе GLO12v2 за 2015 г. (синие точки) и GLO12v4 (черные точки). Представленные оценки усреднены по слоям 0–5 м, 5–100 м, 100–300 м, 300–800 м, 800–2000 м и 2000–5000 м, которые пронумерованы на рисунке от одного до шести на оси ординат: слева — для температуры, справа — для солёности морской воды

тогда как продукты МГИ представляют собой аналоги анализа в реальном масштабе времени. По-видимому, при использовании аналогичных анализов от GLO12 различие в оценках погрешностей было бы еще меньше.

Возникает вопрос, почему значительное улучшение пространственного разрешения численной модели циркуляции океана и применение математически более строгих алгоритмов ассимиляции наблюдений приводит к относительно небольшим улучшениям точности прогнозов. Можно сделать осторожное предположение, что однопараметричность (или одномодовость) вертикальной структуры является фундаментальным свойством изменчивости полей температуры и солёности Мирового океана и океанического типа бассейнов. Поэтому более или менее аккуратный учет этого обстоятельства определяет верхнюю границу точности анализов и прогнозов состояния морской среды. Повышение разрешения модели и использование все более сложных схем ассимиляции без расширения возможностей наблюдательной системы скорее всего будет приводить к относительно небольшому улучшению точности анализов и прогнозов, если не выделить дополнительный ключевой физический механизм, регулирующий морскую динамику.

Отметим также, что достигнутая в системе МГИ оценка точности анализов не может считаться верхней границей точности анализов и прогнозов состояния морской среды. Анализ расчетов по модели и самих реконструированных трехмерных полей температуры и солёности морской воды позволяет выделить три основных источника погрешностей, возникающих при использовании алгоритма, описанного в разделе 2. Прежде всего этот алгоритм не учитывает подвижность фронтальных зон. В итоге регрессия, построенная в точке, находившейся по одну сторону от фронта, может давать заметные погрешности, если в результате смещения фронтального раздела эта точка окажется по другую сторону фронта. Второй особенностью алгоритма является то обстоятельство, что он настроен на описание изменчивости полей океана, связанной с вертикальными смещениями изотермических и изохалинных поверхностей. В силу этого он дает заметные погрешности при субдукции вод верхнего перемешанного слоя океана и горизонтальных перемещениях вод-

ных масс на разных глубинах. Совершенствование алгоритма реконструкции трехмерных полей температуры и солёности морской воды и более аккуратное воспроизведение численной моделью горизонтальных перемещений водных масс даст возможность повысить эффективность упрощенного алгоритма ассимиляции наблюдений и определить ту границу, начиная с которой можно будет отсчитывать повышение качества анализов и прогнозов состояния морской среды при использовании моделей более высокого разрешения и более совершенных алгоритмов ассимиляции наблюдений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение последних десяти лет на основе усилий ряда научных коллективов удалось существенно продвинуться в развитии оперативной океанологии в Российской Федерации, истоки которых в значительной степени опираются на идеи, заложенные Г.И. Марчуком в программе “Разрезы” и в проекте “Черное море как имитационная модель океана” [Marchuk and Paton, 2012]. На основе отечественной модели [Ибраев и др., 2019; Кауркин и др., 2016; Кауркин и др., 2018; Kalmykov et al., 2018] и комплекса NEMO (система МГИ, описанная в настоящей статье, а также прогностическая система ГМЦ [Реснянский и др., 2023]), созданы действующие конфигурации, использующие все доступные оперативные наблюдения для их усвоения в численных моделях глобального прогноза. Созданы и развиваются описанная выше система прогнозов Азово-Черноморского бассейна МГИ и региональные системы прогнозов в Арктике с ассимиляцией наблюдений [Фомин и др., 2021]. Развиваемые прогностические системы являются универсальными и их можно перенести на другие морские акватории, такие как Балтийское, Японское, Каспийское и другие моря Российской Федерации. Развиваемые системы прогнозов, помимо прикладного значения, являются, как показано выше, эффективным инструментом океанологических исследований.

Выявленная во многих исследованиях однопараметричность вертикальной структуры изменчивости морских полей требует дополнительного анализа физической природы этой закономерности. Не вполне ясно, как восстановленная эмпирически вертикальная структура изменчивости полей океана связана с пер-

вой модой волн Россби, особенно в районах с течениями с сильным вертикальным сдвигом скорости течений. Поскольку интенсивные синоптические вихри переносят массу [Chelton et al., 2011], их вертикальная структура должна отличаться от окружающего фона и влиять на дисперсию ошибок при сопоставлении реконструированных полей температуры и солености морской воды с наблюдениями. Не ясно, насколько значительно это влияние. Эти и многие другие вопросы могут быть рассмотрены на основе использования прогностических комплексов в качестве инструмента исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Рисунок 2 подготовлен и любезно предоставлен А.Л. Холодом. Рисунки 3, 4 подготовлены и любезно предоставлены В.В. Фоминым и Н.А. Дианским.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке госзадания по теме № FNNN-2024-0012 “Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений” (шифр “Оперативная океанология”) ФГБУН ФИЦ МГИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агошков В.И., Пармузин Е.И., Шутяев В.П. Ассимиляция данных наблюдений в задаче циркуляции Черного моря и анализ чувствительности ее решения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 643–654.
- Алексеев В.В., Залесный В.Б. Численная модель крупномасштабной динамики океана // Вычислительные процессы и системы / Под ред. Марчука Г.И. М.: Наука, 1993. Вып. 10. С. 232–252.
- База данных “Основные гидрологические характеристики морских устьев рек европейской территории России”. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620681, 18 июля 2012 г.
- Белокопытов В.Н., Жук Е.В. Климатическая изменчивость термохалинных характеристик Черного моря (1950–2023 годы) // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40. № 6. С. 838–852.
- Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948–2007 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 3–15.
- Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке С. / В кн.: Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. М.: ИВМ, 1992. С. 163–231.
- Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
- Залесный В.Б., Гусев А.В., Мошонкин С.Н. Численная модель гидродинамики Черного и Азовского морей с вариационной инициализацией температуры и солености // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 699–716.
- Ибраев Р.А. Суперкомпьютерные технологии для оперативного прогнозирования морской среды // Оперативная океанология и технические средства в интересах ВМФ: материалы совместного заседания командования ГШ ВМФ и Секции океанологии, физики атмосферы и географии ОНЗ РАН / Под ред. акад. Г.Г. Матишова. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019 г. С. 42–82.
- Кауркин М.Н., Ибраев Р.А., Беляев К.П. Усвоение данных АРГО в модель динамики океана с высоким разрешением по методу ансамблевой оптимальной интерполяцией (EnOI) // Океанология. 2016. Т. 56. № 6. С. 852–860.
- Кауркин М.Н., Ибраев Р.А., Беляев К.П. Усвоение данных альтиметрии в модели динамики океана методом ансамблевой интерполяции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 1. С. 64–72.
- Кныш В.В., Моисеенко В.А., Саркисян А.С., Тимченко И.Е. Комплексное использование измерений на гидрофизических полигонах океана в четырехмерном анализе // Докл. АН СССР. 1980. Т. 252. № 4. С. 832–836.
- Коротаев Г.К., Белокопытов В.Н., Дорофеев В.Л., Мизюк А.И., Холод А.Л. Ускорение климатических изменений в верхнем слое Чёрного моря // Докл. РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 518. №1. С. 171–178.
- Коротаев Г.К., Гимранов М.М., Медокс О.В., Ляшок В.Ф. Система оперативного прогноза морской среды // Научно-техническая конференция “Состояние и перспективы развития моделирования в Вооруженных Силах Российской Федерации”. Сб. тр. Москва, 27-й ЦНИИ МО РФ. 2022 г.
- Коротаев Г.К., Кныш В.В., Мизюк А.И. Автомодельное формирование псевдополей плотности (солености, температуры) Черного моря для решения задачи реанализа гидрофизических полей (модельные численные эксперименты) // Экологическая

- безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 22. С. 7–21.
- Кортаев Г.К., Лишаев П.Н., Кныш В.В.* Методика анализа данных измерений температуры и солёности Черного моря с использованием динамического альтиметрического уровня // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 2. С. 26–42.
- Кортаев Г.К., Ратнер Ю.Б., Иванчик М.В., Холод А.Л., Иванчик А.М.* Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 609–617.
- Лишаев П.Н., Кныш В.В., Кортаев Г.К.* Восстановление температуры и солёности в верхнем слое Черного моря по данным псевдоизмерений на нижележащих горизонтах // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 2. С. 114–133.
- Марчук Г.И.* К проблеме формирования термоклина в океане. Некоторые проблемы математики и механики / Под ред. Марчук Г.И., Саркисян А.С. Новосибирск: 1970. С. 190–197.
- Марчук Г.И., Кордзадзе А.А., Скиба Ю.И.* Расчет основных гидрологических полей Черного моря на основе метода расщепления // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 4. С. 379–393.
- Марчук Г.И., Патон Б.Е., Кортаев Г.К., Залесный В.Б.* Информационно-вычислительные технологии — новый этап развития оперативной океанографии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 629–642.
- Марчук Г.И.* Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 303 с.
- Марчук Г.И., Дымников В.П., Курбаткин Г.П., Саркисян А.С.* Программа “Разрезы” и мониторинг Мирового океана // Метеорология и гидрология. 1984. № 8. С. 9–17.
- Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б.* Математические модели геофизической гидродинамики и численные методы их реализации. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 296 с.
- Мизюк А.И., Сендеров М.В., Кортаев Г.К., Саркисян А.С.* Особенности горизонтальной изменчивости температуры поверхности в западной части Черного моря по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 639–648.
- Мизюк А.И., Кортаев Г.К., Григорьев А.В., Пузина О.С., Лишаев П.Н.* Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели // Морской гидрофизический журнал. 2019. № 5. С. 496–510.
- Мизюк А.И., Кортаев Г.К.* Черноморские внутрипикноклинные линзы по результатам численного моделирования циркуляции бассейна // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 1. С. 112–122.
- Мизюк А.И., Кортаев Г.К.* Особенности водообмена между бассейнами Черного и Мраморного морей по результатам численного моделирования с упрощенным представлением пролива // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40. № 5. С. 752–765.
- Мошонкин С.Н., Залесный В.Б., Гусев А.В., Тамсалу Р.* Моделирование турбулентности в задачах циркуляции океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 57–69.
- Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А., Степанов В.Н., Струков Б.С.* Влияние короткопериодных вариаций атмосферных воздействий на крупномасштабную структуру океанографических полей // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 3 (389). С. 75–92.
- Фомин В.В., Панасенкова И.И., Гусев А.В., Чаплыгин А.В., Дианский Н.А.* Система оперативного моделирования Северного Ледовитого океана и прилегающих к нему акваторий на основе российской модели INMOM-Арктика // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 2. С. 205–218.
- Black Sea— In-Situ Near Real Time Observations. URL: https://data.marine.copernicus.eu/product/IN-SITU_BLK_PHYBGCWAV_DISCRETE_MYN-RT_013_03.
- Brasseur P., Verron J.* The SEEK filter method for data assimilation in oceanography: a synthesis // J. Ocean Dynamics. 2006. 56. P. 650–661.
- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Progress in Oceanography. 2011. 91. P. 167–216.
- Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), электронный ресурс. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/> Grieco G. Implementation of NEMO-OPA in configuration ORCAR025 // CMCC Annual reports. 2015. 19 p.
- Global Ocean 1/12° Physics Analysis And Forecast Updated Daily, электронный ресурс. URL: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024
- Guinehut S., Dhomps A.-L., Larnicol G., Le Traon P.-Y.* High resolution 3-D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations // Ocean Sci. 2012. V. 8. P. 845–857.

- NOAA Operational Model Archive and Distribution System, электронный ресурс. URL: <https://nomads.ncep.noaa.gov/>
- Kalmykov V.V., Ibrayev R.A., Kaurkin M.N., Ushakov K.V.* Compact Modeling Framework v3.0 for high-resolution global ocean–ice–atmosphere models // *Geoscientific Model Development*. 2018. V. 11. № 10. P. 3983–3997.
- Knysh V.V., Saenko O.A., Sarkisyan A.S.* Method of assimilation of altimeter data and its test in the tropical North Atlantic // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 1996. V. 11. № 5. P. 333–409.
- Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeev V.L., Demyshev S.G., Kubryakov A.I.* Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // *Ocean Sci.* 2011. V. 7. P. 629–649.
- Large W.G., Yeager S.* Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: the data sets and flux climatologies // *NCAR Technical Note, NCAR/TN-460+STR*, CGD Division of the National Center for Atmospheric Research. 2004. 105 p.
- Lellouche J.-M., Greine E., Le Galloudec O. Garric G., Rognier C., Drevillon M., Benkiran M., Testut C.-E., Bourdalle-Badie R., Gasparin F., Hernandez O., Levier B., Drillet Y., Remy E., Le Traon P.-Y.* Recent updates to the Copernicus Marine Service global ocean monitoring and forecasting real-time 1/12° high-resolution system // *Ocean Sci.* 2018. V. 14. P. 1093–1126.
- Madec G.* and the NEMO team. NEMO ocean engine: Note du pôle de modélisation. Paris: IPSL № 27. January 2016. 402 p.
- Madec G., Imbard M.* A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity // *Clim. Dynam.* 1996. 12. P. 381–388.
- Marchuk G.I., Paton B.E.* The Black Sea as a simulation ocean model // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 2012. V. 27. № 1. P. 1–4.
- Moshonkin S.N., Alekseev G.V., Bagno A.V., Gusev A.V., Dianzky N.A., Zalesny V.B.* Numerical simulation of the North Atlantic — Arctic Ocean — Bering Sea circulation in the 20th century // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modeling*. 2011. V. 26. № 2. P. 161–178.
- NOAA Operational Model Archive and Distribution System, электронный ресурс. URL: <https://nomads.ncep.noaa.gov/>
- Verbrugge N., Mulet S., Guinehut S., Buongiorno-Nardelli B.* ARMOR3D: A 3D multi-observations T, S, U, V product of the ocean // *Geophysical Research Abstracts*. 2017. V. 19. EGU2017-17579.
- Zalesny V.B., Marchuk G.I., Agoshkov V.I., Gusev F.V., Dianzky N.A., Volodin E.M., Tamsalu R.* Numerical modeling of the large-scale ocean circulation on the base of multicomponent splitting method // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modeling*. 2010. V. 25. № 6. P. 581–609.

DEVELOPMENT OF MARINE FORECASTING SYSTEMS AND OBSERVATION ASSIMILATION ALGORITHMS

© 2025 G. K. Korotaev, A. I. Mizyuk*

*Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center “Marine Hydrophysical Institute of RAS”,
Kapitanskaya str., 2, Sevastopol, 299011 Russia*

*e-mail: artem.mizyuk@mhi-ras.ru

The article is devoted to the discussion of G.I. Marchuk's ideas, which stimulated research in the field of operational oceanography and forecasting of the state of the marine environment in the last 10–12 years at the institutes of the Russian Academy of Sciences and Roshydromet. The methodology developed at the Marine Hydrophysical Institute and research teams in France in reconstructing the temperature and salinity of seawater based on satellite observations is described. The application of the simple algorithm for assimilation of observations based on relaxation of the solution of the numerical forecast model to three-dimensional thermohaline fields reconstructed from satellite data in the basins of Azov – Black seas, Arctic and the World Ocean is demonstrated. Estimates of the standard deviations of the thermohaline fields of the global ocean, calculated using assimilation of observations with the simple algorithm, are compared with similar estimates of CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) products based on GLO12 v2 and v4. The reasons for the relatively small discrepancies between the estimates of thermohaline field analyses based on a model with a spatial resolution of 0.25° and the simple algorithm for assimilation of observations and the GLO12 v2 and v4 models with a resolution of 1/12° and a much more complex algorithm for assimilation of observations are discussed.

Keywords: operational marine forecast, data assimilation, numerical simulation of ocean circulation, NEMO, World Ocean