

УДК 551.465

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ОКЕАНА СО СВЕРХВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2020 г. Г. К. Коротаев^{а, *}, В. П. Шутяев^{а, б, **}

^аМорской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, 2, г. Севастополь, 299011 Российская Федерация

^бИнститут вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, ул. Губкина, 8,
г. Москва, 119333 Российская Федерация

*e-mail: gkorotaev@gmail.com

**e-mail: shutyayev@inm.ras.ru

Поступила в редакцию 31.10.2019 г.

После доработки 31.12.2019 г.

Принята к публикации 05.02.2020 г.

В представленной работе дается обзор публикаций, связанных с исследованиями субмезомасштабной изменчивости океана. Отмечается значительный прогресс в понимании особой роли субмезомасштабных процессов в формировании циркуляции океана, взаимодействия океана и атмосферы, включая модуляцию теплообмена и газообмена двух сред, а также их влияния на поступление биогенных элементов в верхний слой океана, достигнутый в последнее время. Отмечается необходимость проведения исследования субмезомасштабной изменчивости океана для повышения качества краткосрочных морских прогнозов. Основой морских прогнозов нового уровня будут модели со сверхвысоким пространственным разрешением, которые позволяют описывать обратный каскад энергии в области субмезомасштабов. В связи с тем, что в ближайшие пять лет ожидается запуск новых приборов, способных проводить площадные наблюдения поверхности морей и океанов с разрешением 2–10 км, обсуждаются возможности использования Черного моря в качестве полигона для развития численных моделей циркуляции в бассейне с разрешением не хуже километра и отработки методов анализа и усвоения наблюдательных технологий следующего поколения.

Ключевые слова: численное моделирование, сверхвысокое разрешение, субмезомасштабная изменчивость, ассимиляция наблюдений, черноморский полигон

DOI: 10.31857/S0002351520030104

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие численного моделирования циркуляции океана началось почти сразу после появления электронных вычислительных машин. Уже в 60-е годы XX века получили развитие численные методы решения “примитивных уравнений”, описывающих крупномасштабную циркуляцию Мирового океана и его отдельных бассейнов. Первоначально численные модели имели довольно грубое пространственное разрешение. Вместе с тем в численных экспериментах удавалось воспроизводить наиболее характерные черты крупномасштабной структуры полей океана. К ним относится главный океанический термоклин, основные океанические круговороты, западные пограничные течения, абиссальная циркуляция, экваториальные противотечения [1].

С начала 70-х годов прошлого века в океанологии произошли революционные изменения, обусловленные открытием синоптической изменчивости Мирового океана [2]. Выяснилось, что наряду с крупномасштабными течениями в океане

наблюдаются интенсивные вихревые структуры и планетарные волны с характерным масштабом, определяемым внутренним радиусом циркуляции Россби. Плотность кинетической энергии синоптических процессов при этом почти всюду существенно выше чем у средних течений. Поэтому текущее состояние морской среды определяется синоптическими процессами и не может быть взято из климатических атласов.

Параллельно с совершенствованием физических представлений о циркуляции океана происходило значительное повышение производительности вычислительной техники. Ее развитие позволило уменьшать шаги сетки при аппроксимации примитивных уравнений и явно разрешать синоптические процессы, используя так называемые вихреразрешающие численные модели.

Переход от моделей с грубым пространственным разрешением к вихреразрешению позволил существенно повысить практическую значимость численного моделирования. Численные расчеты полей океана с реальным атмосферным форсин-

гом довольно неплохо отражают его наблюдаемое состояние. Это обстоятельство, а также бурное развитие оперативных океанографических наблюдений, явилось основой создания систем оперативных морских прогнозов. Современные оперативные морские прогнозы имеют достаточно высокую точность и обеспечивают запросы большого круга потребителей [3].

Значительное повышение точности численных расчетов состояния океана при переходе к вихре-разрешающим моделям имело под собой глубокую физическую основу. Дело в том, что современные методы численного интегрирования примитивных уравнений основаны на конечномерной аппроксимации уравнений в частных производных. При переходе к численным аналогам дифференциальных уравнений приходится параметризовать часть утраченных степеней свободы, связанных с так называемыми подсеточными масштабами. При этом, как правило, используется простейшая параметризация, основанная на введении коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии. Такая параметризация оказывается более или менее удовлетворительной, если происходит передача энергии от крупных масштабов к мелким. Однако при движении тонкого слоя жидкости на быстровращающейся сфере наблюдается обратный поток энергии от мелких к крупным масштабам. При таких обстоятельствах традиционные параметризации турбулентной вязкости и диффузии оказываются слишком грубыми. В силу этого численные модели, не описывающие явно синоптические масштабы, не способны достоверно воспроизводить даже структуру крупномасштабных течений.

Отметим, однако, что синоптическая изменчивость океана, так же, как и крупномасштабная циркуляция, описывается примитивными уравнениями. Поэтому развитые ранее численные методы интегрирования примитивных уравнений при реализации вихре-разрешающих моделей были усовершенствованы с учетом возможности параллельных вычислений. Отметим также использование нерегулярных сеток по горизонтали и разнообразных вертикальных координат. Однако, подсеточные масштабы в вихре-разрешающих моделях по-прежнему рассматриваются как промежуточный диапазон, через который энергия транслируется к еще меньшим масштабам, где происходит ее окончательная диссипация. Высокая точность морских прогнозов на срок до десяти суток во многом обеспечивается хорошей инициализацией используемых моделей посредством ассимиляции доступных спутниковых и контактных оперативных наблюдений.

Дальнейшее развитие вычислительной техники привело к тому, что в последние 10–15 лет все более широкое распространение получают численные модели циркуляции морей и океанов со

сверхвысоким пространственным разрешением [4–7]. Современные вычислительные кластеры позволяют явно воспроизводить в численных расчетах субмезомасштабную (т.е. имеющую пространственный масштаб меньше внутреннего радиуса деформации Россби) изменчивость морской среды. Выполненные численные эксперименты свидетельствуют о широком распространении субмезомасштабной изменчивости полей океана [8]. Спутниковые наблюдения поверхности океана высокого пространственного разрешения убедительно подтверждают выводы, полученные на основе анализа численных расчетов. Они демонстрируют повсеместное присутствие в океане структур, пространственные масштабы которых значительно меньше радиуса деформации Россби.

Наиболее существенным выводом, полученным на основе численных экспериментов, является, однако, установление факта переноса энергии от субмезомасштабов вверх по спектру. Таким образом, вполне возможно, что неточности вихре-разрешающих моделей по крайней мере отчасти обусловлены неверной параметризацией подсеточных масштабов. Следовательно, более аккуратный учет влияния субмезомасштабов в моделях с супервысоким пространственным разрешением может привести к повышению качества оперативных морских прогнозов.

Настоящая работа посвящена анализу направлений развития моделей со сверхвысоким пространственным разрешением. Во втором разделе суммируется достигнутое к настоящему времени представление о природе субмезомасштабной изменчивости полей океана. В третьем разделе обсуждается возможность восстановления трехмерной структуры синоптической и субмезомасштабной изменчивости по наблюдениям поверхности океана. В четвертом разделе дается обзор наблюдательных систем, которые позволяют диагностировать субмезомасштабную изменчивость океана и давать информацию для инициализации прогностических моделей сверхвысокого пространственного разрешения. В пятом разделе обсуждаются принципы ассимиляции наблюдений, которые станут доступными в ближайшие пять лет в моделях циркуляции морей и океанов сверхвысокого разрешения. В шестом разделе обсуждаются перспективы исследований субмезомасштабной изменчивости на акватории Черного моря. В заключении кратко суммируются основные положения, обсуждающиеся в тексте статьи.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОКЕАНА

Модельные численные эксперименты и наблюдения с искусственных спутников Земли (ИСЗ) убедительно показывают, что в океане наблюдается

значительная изменчивость на масштабах, меньших синоптических. В открытом океане характерный масштаб синоптической изменчивости определяется радиусом деформации Россби, величина которого в умеренных широтах находится в диапазоне 40–50 км. Таким образом, 80–100 км можно определить как нижнюю границу диапазона пространственных масштабов, на которых наблюдается синоптическая изменчивость океана в умеренных широтах. Поскольку радиус деформации Россби обратно пропорционален параметру Кориолиса, равного нулю на экваторе и достигающего наибольшего значения на полюсах, то его величина уменьшается к полюсу и увеличивается по направлению к экватору.

К субмезомасштабной изменчивости относятся процессы, имеющие в умеренных широтах характерный масштаб в несколько десятков километров, примыкая на верхней границе к синоптической изменчивости океана, а на нижней границе – к внутренним волнам. Во времени субмезомасштабы имеют периоды, большие инерционного.

На поверхности океана субмезомасштабные явления проявляются в распределении температуры поверхности моря, построенной по данным ИК-сканеров высокого пространственного разрешения, в наблюдениях цвета океана сканирующими спекрофотометрами видимого диапазона и в измерениях рассеяния радиосигналов радиолокаторами с синтезированием апертуры. Численные эксперименты показывают, что субмезомасштабные структуры также выделяются в отклонениях уровенной поверхности моря.

Основные представления о характеристиках субмезомасштабной изменчивости и механизмах ее формирования получены на основе численного моделирования [4, 8]. Численные эксперименты показали, что субмезомасштабные образования концентрируются в верхнем перемешанном слое (ВПС) океана [9]. Ниже ВПС их энергия достаточно быстро затухает. В этом проявляется отличие от синоптической изменчивости океана, охватывающей весь основной пикноклин.

Относительно причины образования субмезомасштабных структур были выдвинуты две гипотезы. Первая [10] связывает их образование с воздействием синоптических вихрей на поле температуры морской поверхности. Действительно, пусть изначально температура ВПС изменяется в одном из направлений (например, с юга на север в связи с неравномерностью прогрева). Течения, индуцированные синоптическими вихрями, могут создавать деформационное поле, в результате чего на фоне изначально пусть даже медленного изменения температуры поверхности океана появятся узкие фронтальные зоны. Дальнейшая неустойчивость этих фронтов приведет к возникновению разнообразных структур, типичных для двумерной турбулентности.

Вторая гипотеза связывает образование субмезомасштабных явлений с неустойчивостью ВПС [11]. Действительно, в случае изменения глубины ВПС по горизонтали возникает наклон его нижней границы. Наклон границы ВПС обуславливает запас доступной потенциальной энергии, которая при определенных условиях высвобождается при развитии бароклинической неустойчивости. Масштаб возникающих при развитии бароклинической неустойчивости структур определяется величиной радиуса Россби, рассчитанного на основе толщины ВПС и перепада температур на его нижней границе. Естественно величина рассчитанного таким образом радиуса Россби будет меньше радиуса Россби первой бароклинической моды, определяющего масштаб синоптической изменчивости. Поэтому субмезомасштабные образования имеют меньший размер, нежели синоптические вихри.

Второй механизм формирования субмезомасштабных структур оказывается более соответствующим наблюдениям. Действительно, численные расчеты [12, 13], а также анализ наблюдений скорости течений, температуры и солёности морской воды [14] указывают на повышение интенсивности субмезомасштабных структур в умеренных широтах в зимнее время. Численные эксперименты показывают, что такое поведение связано с более благоприятными условиями развития бароклинической неустойчивости в зимний период, когда происходит заглупление ВПС. Действительно, с увеличением глубины ВПС увеличивается количество доступной потенциальной энергии, которая может быть высвобождена в результате бароклинической неустойчивости. Кроме того, радиус деформации Россби, рассчитанный на основе глубины ВПС, будет меньше летом и, соответственно, за счет бароклинической неустойчивости будут генерироваться вихри меньшего масштаба, которые могут подавляться атмосферным воздействием [15].

Так или иначе, оба отмеченных механизма приводят к развитию турбулентности в верхнем перемешанном слое. Поскольку вертикальный масштаб субмезомасштабных структур существенно меньше горизонтального, энергетический каскад в этой области масштабов отвечает закономерностям квазигеострофической двумерной турбулентности [16]. Неотъемлемой составляющей субмезомасштабной изменчивости являются достаточно резкие фронты. С ними связан тот или иной тип неустойчивости и формирование субмезомасштабных вихрей. В соответствии с общей закономерностью двумерной турбулентности, мелкомасштабные вихри объединяются в более крупные, обеспечивая перенос энергии вверх по масштабам.

В соответствии с теорией Райнса [17] нелинейные взаимодействия обуславливают перенос энергии к масштабу, соответствующему радиусу Росс-

би, определяемому параметрами ВПС. В окрестности этого масштаба должна происходить передача энергии к более низкой моде движения, т.е. к синоптическим масштабам, что отчасти подтверждается численными расчетами [9]. Таким образом, субмезомасштабы играют значительную роль в перераспределении энергии в верхних слоях океана. В силу переноса энергии вверх по спектру к большим масштабам, развитие субмезомасштабной изменчивости приводит к появлению так называемой “отрицательной вязкости”. Т.е. их параметризация операторами вязкости и диффузии не является адекватной. В моделях циркуляции океана, вообще говоря, следует значительно уменьшить шаг сетки, чтобы явным образом разрешать субмезомасштабную изменчивость. Отметим, однако, что в коротковолновой части спектра в субмезомасштабном диапазоне происходит перенос энергии к малым масштабам [18], возможно, ввиду их агеострофичности и нарушения закономерностей, присущих геострофической турбулентности.

Численные эксперименты показывают также еще одну особенность субмезомасштабных процессов. При их развитии на нижней границе однородного слоя возникают значительные вертикальные скорости, способствующие поступлению в ВПС более холодных вод и существенно влияющих на тепловой баланс верхнего слоя океана [18]. В работе [18] отмечается также, что при учете субмезомасштабов теплообмен океана с атмосферой может значительно измениться. Таким образом, субмезомасштабная изменчивость океана должна учитываться и в климатических моделях.

Обусловленные субмезомасштабной изменчивостью большие вертикальные скорости также способствуют поступлению биогенных элементов в ВПС [19]. Поступление биогенов способствует локальному цветению фитопланктона и отображению субмезомасштабных структур в спутниковых наблюдениях цвета океана.

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ СИНОПТИЧЕСКОЙ И СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА

В серии работ, начиная с [10], проведены исследования возможности восстановления вертикальной структуры изменчивости полей плотности и скорости течений на синоптических масштабах и субмезомасштабах по наблюдениям на поверхности океана. В этих работах предполагается, что субмезомасштабные образования, как и синоптические, могут быть описаны в рамках квазигеострофической модели.

Напомним кратко основные соотношения квазигеострофической модели в стратифицированном океане. Прежде всего считается, что горизонтальные составляющие скорости течений находятся приближенно в геострофическом балансе. Это позволяет ввести функцию тока так, что зональная и меридиональная составляющие скорости течений соответственно задаются выражениями

$$u = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (1)$$

При выводе соотношений (1) учитывается, что параметр Кориолиса f мало меняется на синоптических масштабах и субмезомасштабах. В силу геострофических соотношений нормированное на среднюю плотность давление P выражается через функцию тока

$$P = f\psi.$$

Используя уравнение гидростатики, найдем, что отклонение плотности морской воды ρ от ее локального среднего профиля $\rho_0(z)$, нормированного на среднюю плотность, связано с функцией тока соотношением

$$g\rho = f\frac{\partial \psi}{\partial z}.$$

Вводя частоту Брента–Вяисаля $N^2 = g\frac{d\rho_0}{dz}$ найдем выражение для потенциального вихря ξ в квазигеострофическом приближении

$$\xi = \Delta\psi + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{f^2}{N^2}\frac{\partial \psi}{\partial z}\right).$$

Пусть теперь нам известно распределение потенциальной завихренности в некоторой части океана $\xi_0(x, y, z)$. Также считаем, что на его поверхности известно распределение плотности нормированной аномалии плотности морской воды $\rho(x, y)$ или отклонение уровня поверхности, т.е. $\psi_0(x, y)$.

Тогда решая уравнение

$$\Delta\psi + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{f^2}{N^2}\frac{\partial \psi}{\partial z}\right) = \xi_0(x, y, z)$$

с граничным условием на поверхности океана $f\frac{\partial \psi}{\partial z} = g\rho(x, y)$ или $\psi = \psi_0(x, y)$, а также задавая на дне океана равенство нулю аномалии плотности и из дополнительных соображений – условия на боковых границах области, найдем распределение функции тока во всей области интегрирования.

Наиболее существенным является вопрос о восстановлении распределения потенциальной

завихренности по глубине. Наиболее просто эта проблема решается в случае развития фронтонеза в верхнем слое моря. При этом на поверхности моря наблюдаются значительные градиенты температуры и солёности морской воды, а следовательно, и ее плотности. После выделения в уравнении сохранения потенциального вихря крупномасштабного среднего значения и аномалии, обусловленной синоптической и субмезомасштабной изменчивостью, и серии приближенных преобразований, удается выразить $\xi_0(x, y, z)$ через аномалию плотности на поверхности моря

$$\xi_0(x, y, z) = \alpha(z) \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=0},$$

где $\alpha(z)$ выражается через производные от среднего значения потенциального вихря и средней плотности. Вычислив затем функцию тока, можно построить распределение относительной завихренности и вертикальной скорости течений на любом горизонте. Численные расчеты морской динамики на основе примитивных уравнений показывают [10], что восстановленные по описанной выше методике поля относительной завихренности и вертикальной скорости, очень хорошо соответствуют их точным значениям.

Однако если основным источником энергии при возбуждении субмезомасштабной изменчивости является неустойчивость ВПС, то аномалии плотности на поверхности моря будут незначительными. В этой связи в работе [9] для определения распределения $\xi_0(x, y, z)$ по вертикали предложено использовать разложения по

собственным функциям оператора $\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f^2}{N^2} \frac{\partial}{\partial z} \right)$.

При этом коэффициенты разложений помимо уровня зависят от масштаба процесса. Передаточная функция на масштабах больших 50–60 км имеет значимые величины до глубины около 800 м. С ростом волнового числа она концентрируется в пределах примерно 400 м. Решение уравнения потенциального вихря с заданной уровневой поверхностью и восстановленным распределением $\xi_0(x, y, z)$ позволяет рассчитать распределение относительной завихренности и вертикальную скорость. В работе [9] показано, что восстановленные таким образом поля имеют достаточно высокую точность.

4. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ

Повышение разрешения численных моделей сверхвысокого пространственного разрешения для подготовки оперативных морских прогнозов очевидно требует соответствующей реорганизации наблюдательной системы. В настоящее время единственная реальная возможность наблю-

дать субмезомасштабы на значительной части поверхности океана основывается на проведении наблюдений с ИСЗ. Наиболее удобными полями для наблюдений поверхностных проявлений субмезомасштабов на поверхности океана являются температура морской поверхности (ТПО) и уровень моря. Сложность использования спутниковых наблюдений ТПО связана с влиянием облачности. Исключительно полезную информацию о субмезомасштабных процессах дают сканеры ИК и видимого диапазонов спектра электромагнитных волн. Однако влияние облачности существенно сокращает возможность построения регулярных наблюдений за субмезомасштабами только на основе таких измерений. В последнее время наблюдения ТПО проводятся также с геостационарных ИСЗ с высокой частотой во времени и со все более высоким пространственным разрешением. Это обстоятельство в перспективе даст возможность наблюдать проявления субмезомасштабов в распределении ТПО на значительных участках поверхности океана и использовать их для исследований субмезомасштабной изменчивости.

Эффективный контроль субмезомасштабной изменчивости может быть осуществлен также посредством наблюдений топографии морской поверхности. Однако традиционные альтиметры, которые оказались весьма полезными для наблюдений синоптической изменчивости океана, не обеспечивают необходимое пространственное разрешение и покрытие поверхности океана. В этой связи в ближайшее время планируется реализация нового подхода к наблюдениям топографии океана, основанного на технике интерферометрии [20]. Новые панорамные альтиметры будут производить измерения в более широкой полосе и по расчетам должны обеспечить разрешение процессов в диапазоне длин волн от 15 до 100 км.

Наиболее детально обсуждается программа SWOT (The Surface Water and Ocean Topography Mission) [20]. Панорамный альтиметр SWOT будет проводить измерения топографии поверхности моря в двух полосах шириной по 50 км, разделенных полосой 20 км, где наблюдения отсутствуют. Дополнительно на спутнике планируется установить традиционный альтиметр, который будет проводить измерения топографии морской поверхности в надир. Полосы, вдоль которых планируется проводить наблюдения, будут в точности повторяться через 21 день. Однако, ввиду частичного их перекрытия в различных районах океана, достаточно полное покрытие морской поверхности можно ожидать в течение 10 дней.

Другая сходная по своему назначению альтиметрическая миссия COMPIRA [21] планируется к запуску Агентством аэрокосмических исследований Японии. Измерения топографии поверхно-

сти океана планируется проводить в двух полосах 80 км шириной слева и справа от направления полета ИСЗ. Заявленное пространственное разрешение составляет 5 км. Посредине в полосе шириной 20 км наблюдения не проводятся так же, как и в программе SWOT. Орбиты ИСЗ будут повторяться через 10 дней. В отличие от программы SWOT, обеспечивающей глобальное покрытие Мирового океана, наблюдения миссии COMPIRA будут проводиться только на акватории Тихого океана и в северной половине Индийского океана.

Еще один проект, ориентированный на наблюдения с ИСЗ субмезомасштабной динамики, SEASTAR основан на использовании радарных наблюдений для восстановления скорости поверхностных течений с разрешением около 1 км [22]. Наблюдения планируется проводить в полосе несколько сотен километров шириной с изначальным разрешением в несколько десятков метров. Затем, в результате обработки будет построено поле скорости поверхностных течений с точностью в 10 см/с по модулю и около 20° по направлению. Отметим также, что полезную информацию о субмезомасштабных процессах в верхнем слое океана дают также и традиционные радиолокаторы с синтезированием апертуры.

При реализации заявленных планов по совершенствованию спутниковых наблюдательных систем будет достигнут значительный прогресс в детализации роли субмезомасштабных процессов. Конечно, каждая из представленных выше систем обладает своими недостатками. Панорамная альтиметрия, вообще говоря, имеет недостаточное пространственное разрешение. Радиолокация дает возможность измерять скорость поверхностных течений с относительно невысокой точностью и т.д. В силу этого наиболее значительный эффект от новых перспективных спутниковых миссий несомненно будет достигнут за счет формирования совмещенной базы данных и комплексного анализа перечисленных выше наблюдений. В этом отношении ассимиляция наблюдений нового уровня в моделях циркуляции океана со сверхвысоким пространственным разрешением позволит компенсировать недостатки отдельных наблюдательных систем. Соответственно следует ожидать повышения точности оперативных морских прогнозов за счет ассимиляции в численных моделях новых потоков данных наблюдений.

5. ПРОБЛЕМЫ АССИМИЛЯЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ РАЗРЕШЕНИИ СУБМЕЗОМАСШТАБОВ

Новые возможности проведения расчетов циркуляции морей и океанов с явным разрешением субмезомасштабов потенциально должны улучшить качество морских прогнозов. Вместе с тем, в последнее время появились исследования, показы-

вающие, что повышение пространственного разрешения численных моделей само по себе не только не улучшает, но даже понижает качество прогноза [23]. В работе [23] сопоставлялись результаты прогнозов по модели циркуляции в Тасмановом море с разрешением 2.5 и 10 км. При этом инициализация обеих моделей проводилась на основе существующих сейчас спутниковых и контактных наблюдений однотипным образом. Оказалось, что повышение разрешения модели приводит к ухудшению точности прогноза. Авторы исследования связывают это обстоятельство с некачественным воспроизведением в модели с более высоким разрешением потока энергии от субмезомасштабов вверх по спектру. Представляется естественным, что при повышении пространственного разрешения модели необходимо использовать и наблюдения, которые давали бы возможность точнее определять расположение субмезомасштабных структур в пространстве, что могло бы гарантировать определенную точность воспроизведения потоков энергии по спектру масштабов. Перечисленные в предыдущем разделе перспективные спутниковые программы дают возможность получать значительно более высокое пространственное разрешение наблюдений. Поэтому при их ассимиляции в моделях циркуляции океана можно ожидать улучшение точности морских прогнозов.

Первоначально возможно использовать основанные на фильтре Калмана простые подходы, идейно близкие к четырехмерному анализу Гандина [24], хорошо зарекомендовавшие себя при ассимиляции наблюдений в вихреразрешающих моделях. Однако наилучшую точность дают новые поколения схем ассимиляции, базирующиеся на четырехмерном вариационном усвоении данных (4D-VAR) и ансамблевым фильтром Калмана (EnKF) [25–28].

При ассимиляции наблюдений методом EnKF, так же, как и в классическом фильтре Калмана, ключевую роль играет ковариационная матрица. Эта матрица рассчитывается на основе метода Монте-Карло на каждом шаге по времени усреднением по конечному числу траекторий модели, рассчитанных со случайными начальными условиями. С ее помощью ансамблевый фильтр Калмана ассимилирует наблюдения последовательно в каждый конкретный момент времени.

Вариационная ассимиляция основана на идее минимизации некоторого функционала, связанного с данными наблюдений, на траекториях (решениях) рассматриваемой модели. Тем самым, задача об усвоении данных формулируется как задача оптимального управления. Теоретические основы исследования и решения таких задач заложены в классических работах [29, 30] и др. При решении задач минимизации возникает необходимость вычислять градиент исходного функцио-

нала. Важным шагом в этом направлении было использование теории сопряженных уравнений [29, 30], применение которых для исследования и численного решения задач об усвоения данных широко практикуется многими исследователями начиная с известных работ [31–34]. В отличие от метода EnKF, где наблюдения ассимилируются последовательно, в методе 4D-VAR оптимизация решения модели происходит сразу на всем интервале времени в окне ассимиляции.

Впервые система 4D-VAR, основанная на работе [33], была применена в Европейском Центре прогноза погоды. Другой подход к вариационному усвоению наблюдений разработан и обоснован сотрудниками ИВМ РАН. Главная особенность предложенных алгоритмов – использование метода расщепления по физическим процессам и геометрическим координатам, что позволило упростить рассматриваемые задачи на каждом шаге расщепления и сделать эффективной реализацию алгоритмов вариационной ассимиляции [35, 36].

В случае линейной модели, линейного оператора и гауссовских ошибок наблюдений, как известно, методы 4D-VAR и фильтр Калмана дают идентичные результаты в конце “окна” ассимиляции, если не учитываются ошибки модели. Далее, в тех же предположениях о линейности и гауссовости при достаточно большом числе элементов ансамбля метод EnKF хорошо аппроксимирует фильтр Калмана [37]. Нелинейности модели и оператора наблюдений (и как следствие, негауссовость ошибок) являются потенциальной причиной расхождения результатов при применении 4D-VAR и EnKF [38]. В том случае, когда ошибки наблюдений и начального приближения (бэ́кграунда) остаются гауссовскими, а модель динамики нелинейна, метод 4D-VAR дает оценку максимального правдоподобия – моду функции распределения апостериорной условной вероятности. В то же время в общем случае неясно, как отыскание такой моды связано с результатом метода EnKF [38].

В задаче описания динамики океана с разрешением субмезомасштабов размерность вектора состояния системы столь велика, что будет необходимо искать компромисс между вычислительными возможностями и теоретически оптимальными подходами. Например, методу EnKF присущи ошибки выборки (sampling errors) из-за ограниченного размера ансамбля, а в методе 4D-VAR из-за большой размерности приходится искать аппроксимации ковариационных матриц бэ́кграунда, что также приводит к ошибкам, которые трудно оценить при сравнительном анализе методов.

При больших размерностях вектора состояния работа с ковариационными матрицами в методе EnKF становится серьезной вычислительной про-

блемой. Использование ограниченного числа элементов ансамбля приводит к ухудшению аппроксимации фильтра Калмана. С другой стороны, в методе 4D-VAR при использовании итерационных градиентных методов приходится строить и решать линейризованные прямые и сопряженные задачи, что зачастую является большой проблемой для сложных моделей динамики океана [39].

Проведенные численные сравнения 4D-VAR и EnKF [38, 40, 41] показали, что для малых интервалов по времени EnKF дает более точные результаты. Для наблюдений с пропусками в данных, когда ансамблевые возмущения растут нелинейно и становятся негауссовскими, 4D-VAR приводит к меньшим ошибкам, чем EnKF [40]. Следует отметить, что EnKF оказывается более предпочтительным с точки зрения распараллеливания алгоритма, поскольку вычисления для каждого члена ансамбля можно проводить независимо [41].

Синтезом широкой дискуссии по сравнению методов 4D-VAR и EnKF [38, 40, 41] явилось признание необходимости разработки новых подходов к усвоению данных, объединяющих методы 4D-VAR и EnKF, которые содержали бы их лучшие стороны [42]. Так появился гибридный подход, сочетающий в себе ансамблевый метод Калмана и вариационное усвоение данных – Hybrid 4DVar [42, 43], а также ансамблевый метод четырехмерного вариационного усвоения данных 4DEnVar [44, 45].

Современные методы ассимиляции наблюдений уже используются в исследованиях, основанных на методе близнецов, для оценки потенциального вклада панорамных альтиметрических наблюдений [46]. Результаты расчетов оказываются обнадеживающими, однако в процессе исследований идентифицированы новые проблемы, связанные с особенностями спутниковых наблюдений, ошибки которых уже не могут рассматриваться некоррелированными [47] и наложением внутренних волн на рассматриваемый интервал масштабов [48].

Необходимы дальнейшие интенсивные исследования субмезомасштабных процессов на основе численного моделирования со сверхвысоким пространственным разрешением и использованием современных методов ассимиляции наблюдений для создания базиса систем морских прогнозов совершенно нового уровня.

6. ЧЕРНОЕ МОРЕ КАК ПОЛИГОН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Международная кооперация, разрабатывающая стратегию развития программы SWOT, предлагает в первую очередь провести детальные исследования (включая численное моделирование)

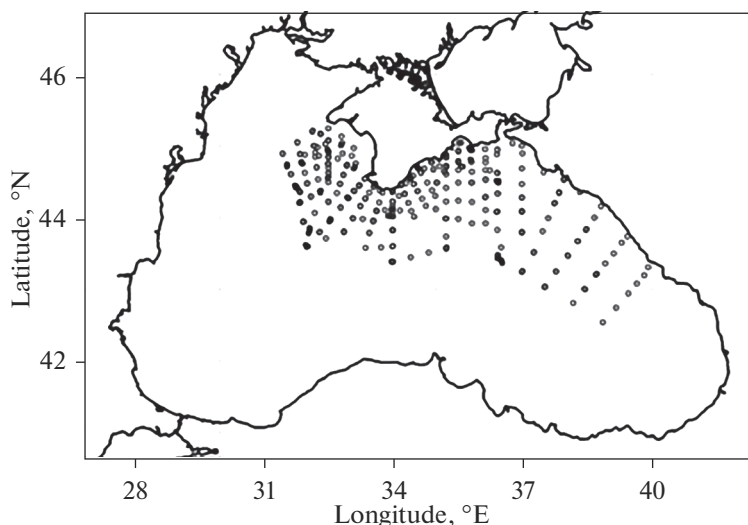


Рис. 1. Гидрологические наблюдения в экономической зоне РФ в Черном море.

на небольших тестовых полигонах. В России такого рода исследования можно провести на Черном море. Экономическая зона РФ между Сочи и Севастополем сочетает широкую сеть междисциплинарных регулярных наблюдений ИО РАН в районе Геленджика и МГИ РАН в районе Кацивели. В течение каждого года на всей отмеченной акватории проводятся регулярные комплексные судовые съемки (рис. 1). Кроме того, на эту область даются ежедневные прогнозы и анализы состояния морской среды Центром морских прогнозов МГИ РАН и осуществляется систематический прием и обработка всех доступных наблюдений с ИСЗ. По наблюдениям с ИСЗ в ряде работ [49–51] показано существование в Черном море развитой субмезомасштабной изменчивости. Отметим, что идентифицированные по спутниковым наблюдениям субмезомасштабные вихри наблюдаются как вдоль побережья, так и в открытом море [50].

Черное море является также весьма удобным бассейном для проведения численных расчетов со сверхвысоким пространственным разрешением [7, 52], поскольку оно практически замкнуто и имеет относительно простую конфигурацию. Расчеты с высоким пространственным разрешением показывают, что в Черном море наблюдается высокая изменчивость в широком диапазоне масштабов (рис. 2). На этом рисунке представлена топография уровня морской поверхности на 4 сентября 2008 г., полученная в расчете по модели НЕМО с шагом сетки 1.157 км. На рис. 2 хорошо видны синоптические структуры как в прибрежной, так и в открытой части моря. Более подробно изменчивость Черного моря в экономической зоне РФ представлена на рис. 3. На этом рисунке построена карта распределения потенциальной завихренности в конце февраля 2008 г. на глубине 4 м в северо-восточной части Черного моря. В

распределении завихренности выделяются тонкие особенности струи основного Черноморского течения (ОЧТ), вихри с масштабом менее 10 км, грибовидные структуры и филаменты. Таким образом, северо-восточная часть Черного моря является подходящим объектом для исследований субмезомасштабной изменчивости.

Важным разделом исследований должно быть проведение расчетов с ассимиляцией спутниковых наблюдений нового поколения. В работах сотрудников ИВМ РАН разработаны и обоснованы алгоритмы численного решения задач вариационной ассимиляции данных спутниковых наблюдений о температуре и уровне поверхности океана и данных о температуре и солёности с системы буев ARGO с использованием разработанной в ИВМ РАН глобальной трехмерной модели гидротермодинамики океана [35, 36, 53]. Главная особенность предложенных алгоритмов – использование метода расщепления по физическим процессам и геометрическим координатам, что позволило упростить рассматриваемые задачи на каждом шаге расщепления и сделать эффективной реализацию алгоритмов вариационной ассимиляции. Алгоритмы вариационной ассимиляции уже доведены до реализации в модели динамики Черного моря [54].

При проведении исследований в Черном море возможно также использовать алгоритм ассимиляции 4D-var, являющийся одним из компонентов системы НЕМО.

Методы вариационной ассимиляции, однако, требуют больших затрат вычислительных ресурсов. В этом отношении привлекательным представляется также развитие более экономичных схем ассимиляции. В частности, возможно рассмотреть использование квазигеострофического приближения при ассимиляции наблюдений си-

time_centered = 2008-09-04T12:00:00, time_count...

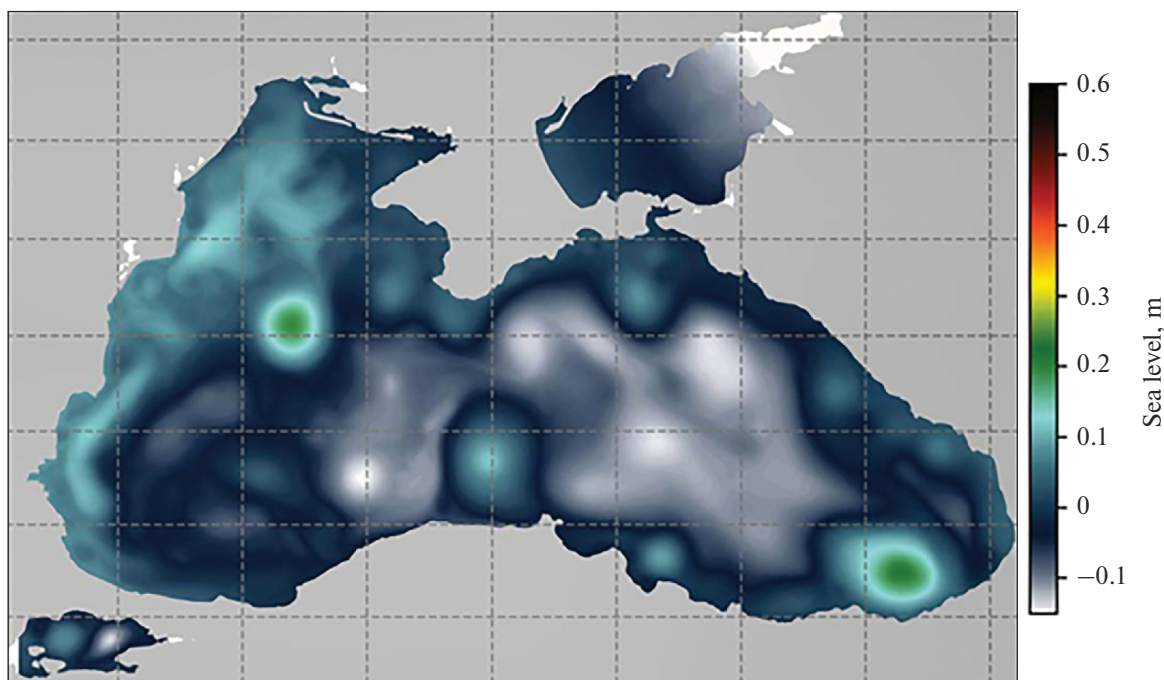


Рис. 2. Карта уровня поверхности Черного моря в сентябре 2008 г. по результатам численного моделирования, выполненного А.И. Мизюком.

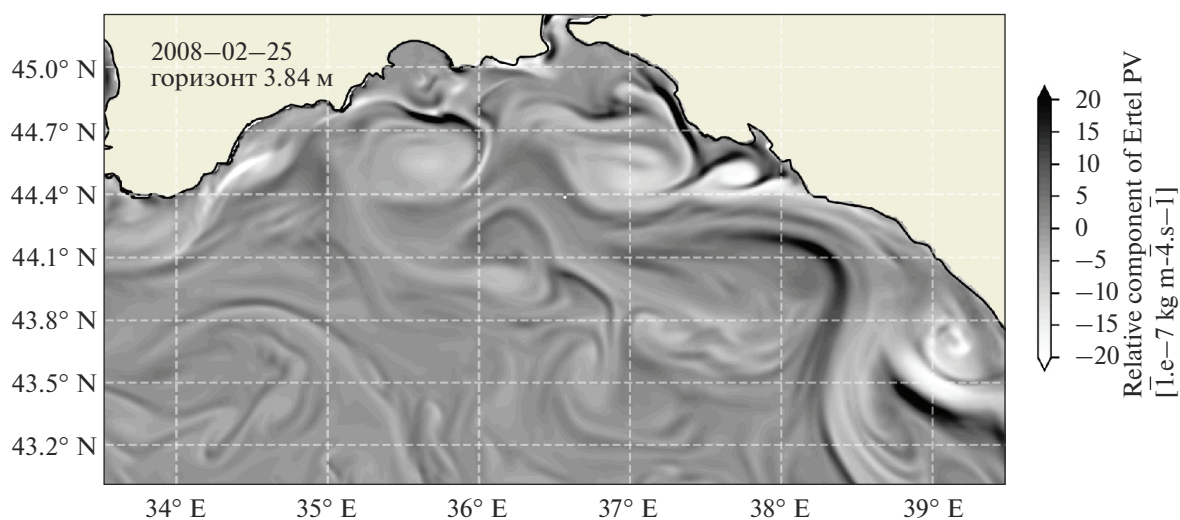


Рис. 3. Распределение потенциальной завихренности в северо-восточной части Черного моря в конце февраля 2008 г. по результатам численного моделирования, выполненного А.И. Мизюком.

ноптических и субмезомасштабных процессов. Обсужденная выше методология восстановления вертикальной структуры полей плотности и скорости течений на синоптических и субмезомасштабах по наблюдениям на поверхности океана позволяет по-новому посмотреть на проблему ассимиляции наблюдений поверхности океана. Основываясь на работах [9, 10] положим, что ошибки прогноза можно описать на основе квазигеостро-

фического приближения. В этом случае можно описать все невязки прогноза с помощью функции тока, удовлетворяющей уравнению

$$\Delta\Psi + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f^2}{N^2} \frac{\partial\Psi}{\partial z} \right) = \delta\xi_0(x, y, z). \quad (2)$$

В правой части этого уравнения теперь стоит неизвестная ошибка прогноза потенциального

вихря. Используя алгоритм работы [9], можно выразить $\delta\xi_0(x, y, z)$ приближенно через известную невязку прогноза уровня моря. Затем, решая уравнение (2) с функцией тока на поверхности моря пропорциональной невязке прогноза уровня и условием ее затухания с удалением от поверхности, найдем сначала невязки для скоростей течений и плотности морской воды (а через T-S соотношение — температуры и солёности). Далее с помощью этих невязок скорректируем все поля, рассчитанные по модели, и получим новые начальные условия для последующего прогноза. В целом построенный на основе квазигеострофического приближения и методологии работ [9, 10] метод ассимиляции может оказаться привлекательным своей экономичностью. Однако с ним сопряжены определенные трудности, связанные с тем, что передаточная функция, полученная в работе [9] для расчета аномалии потенциального вихря по наблюдениям топографии поверхности океана, зависит от масштабов процессов, что требует дополнительных исследований.

Целесообразно также оценить возможности традиционного четырехмерного анализа при ассимиляции наблюдений в моделях со сверхвысоким пространственным разрешением [55]. Этот метод успешно применяется при ассимиляции наблюдений в вихреразрешающих моделях [56], что объясняется вкладом низкой моды в формирование синоптической изменчивости [57, 58]. Поскольку значительная часть субмезомасштабной изменчивости может быть описана квазигеострофическим приближением (см. раздел 3), можно рассмотреть вертикальную структуру движений, связанных с ВПС, основываясь на анализе собственных функций оператора (2). Учитывая, что частота Вьясыля—Брента в перемешанном слое существенно меньше, чем в основном пикноклине, можно выделить семейство собственных функций, амплитуда которых мала вне ВПС. Можно предположить, что так же, как и для синоптических масштабов, энергия субмезомасштабной изменчивости, связанной с перемешанным слоем, концентрируется в такой моде, которая сохраняет знак в пределах ВПС. На этой основе можно построить экономичную схему ассимиляции данных панорамной альтиметрии, аналогичную описанной в [55] и корректирующую субмезомасштабы.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время в развитии океанологии наблюдается значительный прогресс, связанный с пониманием особой роли субмезомасштабных процессов в формировании циркуляции океана, взаимодействия океана и атмосферы, включая модуляцию теплообмена и газообмена двух сред, а также их влияния на поступление биогенных элементов в верхний слой океана. По имеющим-

ся к настоящему времени представлениям точный учет субмезомасштабных процессов может до 20% изменить оценки потоков на границе океана и атмосферы, что может потребовать значительной модификации представлений о роли океана в современных климатических изменениях. Исследования субмезомасштабной изменчивости необходимы также для повышения качества краткосрочных морских прогнозов. Последние анализы временных и пространственных спектров в интервале субмезомасштабов и многочисленные численные расчеты со сверхвысоким пространственным разрешением показывают, что с этим типом изменчивости связан обратный каскад энергии, не позволяющий параметризовать их в терминах турбулентной вязкости и диффузии. Поэтому дальнейшее повышение точности морских прогнозов (и, соответственно, среднесрочных прогнозов погоды) связано с детальным исследованием субмезомасштабной изменчивости. В ближайшие 5 лет рядом космических агентств планируется запуск новых приборов, способных проводить площадные наблюдения с разрешением 2–10 км. Для развития методов анализа и усвоения этих наблюдений необходимо проводить специальные эксперименты в хорошо контролируемых условиях. Черноморский бассейн с развитой наблюдательной базой и удобной конфигурацией для численного моделирования может стать полигоном для исследования субмезомасштабов и развития методов морских прогнозов на основе использования наблюдательных технологий следующего поколения.

Благодарности. Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте РАН при финансовой поддержке РФФ (грант № 17–77–30001).

Авторы благодарны А.И. Мизюку, предоставившему рис. 2 и 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б. Математические модели геофизической гидродинамики и численные методы их реализации. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1987. 296 с.
2. Бреховских Л.М., Иванов-Францевич Г.Н., Кошляков М.Н., Федоров К.Н., Фомин Л.М., Ямпольский А.Д. Некоторые результаты гидрофизического эксперимента на полигоне в Тропической Атлантике // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1071. Т. 7. № 5. С. 511–528.
3. Ocean weather forecasting / Chassignet E.P., Verron J. (eds.). Dordrecht: Springer, 2006. 577 p.
4. Chassignet E.P., Xu X. Impact of horizontal resolution ($1/12^\circ$ to $1/50^\circ$) on Gulf Stream separation, penetration, and variability // J. Phys. Oceanogr. 2017. № 47. P. 1999–2021.
5. Гусев А.В., Залесный В.Б., Фомин В.В. Методика расчета циркуляции Черного моря с улучшенным

- разрешением в районе полигона ИО РАН // Океанология. 2017. Т. 57. № 6. С. 978–989.
6. Дианский Н.А., Фомин В.В., Жохова Н.В., Коршенко А.В. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи на основе численного моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 664–675.
 7. Мизюк А.И., Сендеров М.В., Коротаев 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. 570–578.
 8. Zhan Su, Jinbo Wang, Patrice Klein, Andrew F. Thompson, Dimitris Menemenlis. Ocean submesoscales as a key component of the global heat budget // Nature Communications. 2018. № 9. P. 775.
 9. Ponte A.L., Klein P. Reconstruction of the upper ocean 3D dynamics from high-resolution sea surface height // Ocean Dynamics. 2013. № 63. P. 777–791.
 10. Lapeyre G., Klein P. Dynamics of the upper oceanic layers in terms of surface quasigeostrophy theory // J. Phys. Oceanogr. 2006. V. 36. P. 165–176.
 11. Boccaletti G., Ferrari R., Fox-Kemper B. Mixed layer instabilities and restratification // J. Phys. Oceanogr. 2007. № 37. P. 2228–2250.
 12. Capet X., McWilliams J.C., Mookmaker M.J., Shchepetkin A.F. Mesoscale to submesoscale transition in the California current system. Part I: flow structure, eddy flux, and observational tests // J. Phys. Oceanogr. 2008. № 38. P. 29–43.
 13. Mensa J.A., Garraffo Z., Griffa A., Özgökmen T.M., Haza A., Veneziani M. Seasonality of the submesoscale dynamics in the Gulf Stream region // Ocean Dynamics. 2013. № 63. P. 923–941.
 14. Callies J., Ferrari R., Klymak J.M., Gula J. Seasonality in submesoscale turbulence // Nat. Commun. 2015. № 6. P. 6862.
 15. Marshall J., Schott F. Open-ocean convection: observations, theory, and models // Reviews of Geophysics. 1999. № 37(1). P. 1–64.
 16. McWilliams J.C. Submesoscale currents in the ocean // Proc. R. Soc. 2016. A472: 20160117.
 17. Rhines P.B. Geostrophic turbulence // Annual Review of Fluid Mechanics. 1979. № 11. P. 401–441.
 18. Klein P., Lapeyre G., Siegelman L., Qiu B., Fu L.-L., Torres H. et al. Ocean-scale interactions from space // Earth and Space Science. 2019. № 6. P. 795–817.
 19. McGillicuddy Jr. D.J. Mechanisms of physical-biological-biogeochemical interaction at the oceanic mesoscale // Annual Review of Marine Science. 2016. № 8. P. 125–159.
 20. Rosemary Morrow, Lee-Lueng Fu, Fabrice Arduin, Mounir Benkiran, Bertrand Chapron, Emmanuel Cosme, Francesco D'Ovidio, Farrar J.T., Sarah T. Gille, Guillaume Lapeyre, Pierre Yves Le Traon, Ananda Pascual, Aurelien Ponte, Bo Qiu, Nicolas Raschle, Clement Ubelmann, Jinbo Wang, Edward Zaron. Global observations of fine-scale ocean surface topography with the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission // Frontiers in Marine Science. April 2019. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00232>
 21. Uematsu A., Nakamura R., Nakajima Y., Yajima Y. X-band interferometric SAR sensor for the Japanese altimetry mission, COMPIRA // 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS. Melbourne, 2013. P. 2943–2946.
 22. Gommenginger C., Chapron B., Hogg A., Buckingham C., Fox-Kemper B., Eriksson L., Soulat F., Ubelmann C., Ocampo-Torres F., Buongiorno Nardelli B., Griffin D., Lopez-Dekker P., Knudsen P., Andersen O., Stenseng L., Stapleton N., Perrie W., Violante-Carvalho N., Schulz-Stellenfleth J., Woolf D., Isern-Fontanet J., Arduin F., Klein P., Mouche A., Pascual A., Capet X., Hauser D., Stoffelen A., Morrow R., Aouf L., Breivik O., Fu L.-L., Johannessen J.A., Aksenov Y., Bricheno L., Hirschi J., Martin A.C.H., Martin A.P., Nurser G., Polton J., Wolf J., Johnsen H., Soloviev A., Jacobs G.A., Collard F., Groom S., Kudryavtsev V., Wilkin J., Navarro V., Babanin A., Martin M., Siddorn J., Saulter A., Rippeth T., Emery B., Maximenko N., Romeiser R., Graber H., Alvera Azcarate A., Hughes C.W., Vandemark D., da Silva J., Van Leeuwen P.J., Naveira-Garabato A., Gemmrich J., Mahadevan A., Marquez J., Munro Y., Doody S., Burbidge G. SEASTAR: A mission to study ocean submesoscale dynamics and small-scale atmosphere-ocean processes in coastal, shelf and polar seas // Front. Mar. Sci. 2019. V. 6. P. 457.
 23. Sandery A., Sakov P. Ocean forecasting of mesoscale features can deteriorate by increasing model resolution towards the submesoscale // Nature Communications. 2017. № 8. P. 1566.
 24. Кныш В.В., Коротаев Г.К., Мизюк А.И., Саркисян А.С. Усвоение гидрологических наблюдений для расчета течений в морях и океанах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 1. С. 67–85.
 25. Asch M., Bocquet M., Nodet M. Data assimilation: methods, algorithms, and applications. Philadelphia, SIAM, 2016. 324 p.
 26. Fletcher S.J. Data assimilation for the geosciences: from theory to application. Amsterdam: Elsevier, 2017. 976 p.
 27. Carrassi A., Bocquet M., Bertino L., Evensen G. Data assimilation in the geosciences: an overview of methods, issues, and perspectives // WIREs Clim. Change. 2018. V. 9(5).
 28. Шутяев В.П. Методы усвоения данных наблюдений в задачах физики атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 17–34.
 29. Марчук Г.И. О постановке некоторых обратных задач // ДАН СССР. 1964. Т. 156. № 3. С. 503–506.
 30. Lions J.L. Contrôle optimal de systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles. Paris: Dunod, 1968. 426 p.
 31. Пененко В.В., Образцов Н.В. Вариационный метод для полей метеорологических элементов // Метеорология и гидрология. 1976. Т. 11. С. 1–11.
 32. Marchuk G.I., Penenko V.V. Application of optimization methods to the problem of mathematical simulation of at-

- ospheric processes and environment // Modelling and Optimization of Complex Systems. Proc. of the IFIP-TC7 conf. N.Y.: Springer, 1978. P. 240–252.
33. *Le Dimet F.X., Talagrand O.* Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects // *Tellus A.* 1986. V. 38. P. 97–110.
 34. *Lewis J., Derber J.* The use of adjoint equations to solve a variational adjustment problem with advective constraints // *Tellus A.* 1985. V. 37. P. 309–322.
 35. *Агошков В.И., Ипатов В.М., Залесный В.Б., Шутяев В.П., Пармузин Е.И.* Задачи вариационной ассимиляции данных наблюдений для моделей общей циркуляции океана и методы их решения // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46. № 6. С. 1–37.
 36. *Залесный В.Б., Агошков В.И., Шутяев В.П., Ле Диме Ф., Ивченко В.О.* Задачи численного моделирования гидродинамики океана с вариационной ассимиляцией данных наблюдений // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2016. Т. 52. № 4. С. 488–500.
 37. *Evensen G.* The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation // *Ocean Dynamics.* 2003. V. 53(4). P. 343–367.
 38. *Caya A., Sun J., Snyder C.* A Comparison between the 4DVAR and the ensemble Kalman filter techniques for radar data assimilation // *Monthly Weather Review.* 2005. V. 133(11). P. 3081–3094.
 39. *Mogensen K., Balmaseda M.A., Weaver A.T., Martin M., Vidard A.* NEMOVAR: a variational data assimilation system for the NEMO ocean model // *ECMWF Technical Memorandum,* 2009. № 120.
 40. *Kalnay E., Li H., Miyoshi T., Yang S.-C., Ballabrera-Poy J.* 4D-Var or ensemble Kalman filter? // *Tellus.* 2007. V. A 59. P. 758–773.
 41. *Fairbairn D., Pring S.R., Lorenc A.C., Roulstone I.* A comparison of 4DVar with ensemble data assimilation methods // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2014. V. 140. P. 281–294.
 42. *Gustafsson N., Bojarova J., Vignes, O.* A hybrid variational ensemble data assimilation for the High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) // *Nonlin. Processes Geophys.* 2014. V. 21. P. 303–323.
 43. *Clayton A.M., Lorenc A.C., Barker D.M.* Operational implementation of a hybrid ensemble/4D-Var global data assimilation at the Met Office // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2013. V. 139. P. 1445–1461.
 44. *Desroziers G., Camino J.-T., Berre L.* 4D-EnVar: link with 4D state formulation of variational assimilation and different possible implementations // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2014. V. 140. P. 2097–2110.
 45. *Gustafsson N., Bojarova J.* Four-dimensional ensemble variational (4D-En-Var) data assimilation for the High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) // *Nonlin. Processes Geophys.* 2014. V. 21. P. 745–762.
 46. *Simon Verrieri, Pierre-Yves Le Traoni, Elisabeth Remy, Jean Michel Lellouche.* Assessing the impact of SAR altimetry for global ocean analysis and forecasting // *J. Operational Oceanography.* 2018. V. 11(2). P. 82–86.
 47. *Yaremchuk M., D’Addezio J.M., Panteleev G., Jacobs G.* On the approximation of the inverse error covariances of high-resolution satellite altimetry data // *Quarterly J. Royal Meteorological Society.* 2018. № 144. P. 1995–2000.
 48. *Duda T.F., Zhang W.G., Helfrich, K.R. Newhall A.E., Lin Y.-T., Lynch J.F., Lermusiaux P.F.J., Haley Jr. P.J., Wilkin J.* Issues and progress in the prediction of ocean submesoscale features and internal waves // *OCEANS’14 MTS/IEEE.* 2014. P. 1–8.
 49. *Karimova S.* Eddy statistics for the Black Sea by visible and infrared remote sensing // *Remote Sensing of the Changing Oceans / D. Tang (Ed.) Berlin: Springer,* 2011. P. 61–75.
 50. *Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I.* Satellite remote sensing of submesoscale eddies in the Russian seas // *The Ocean in Motion / Veldarde M.G. et al. (eds.). Springer: Berlin,* 2018. P. 397–413.
 51. *Zatsepin A., Kubryakov A., Aleskerova A., Elkin D., Kukulleva O.* Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea // *Ocean Dynamics.* 2019. V. 69(2). P. 253–266.
 52. *Марчук Г.И., Патон Б.Е., Коротаев Г.К., Залесный В.Б.* Информационные технологии – новый этап развития оперативной океанографии // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2013. Т. 49. № 6. С. 1–14.
 53. *Агошков В.И., Пармузин Е.И., Шутяев В.П.* Численный алгоритм вариационной ассимиляции данных наблюдений о температуре поверхности океана // *Журн. вычислительной математики и математической физики.* 2008. Т. 48. № 8. С. 1371–1391.
 54. *Агошков В.И., Шутяев В.П., Пармузин Е.И., Захарова Н.Б., Шелопут Т.О., Лезина Н.Р.* Вариационная ассимиляция данных наблюдений в математической модели динамики Черного моря // *Морской гидрофизический журн.* 2019. № 6. С. 15–24.
 55. *Кныш В.В., Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К., Саркисян А.С.* Методика и результаты ассимиляции климатических данных по температуре, солености и уровню в численной модели Черного моря // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 43. № 3. С. 398–412.
 56. *Коротаев Г.К., Ратнер Ю.Б., Иванчик М.В., Холод А.Л., Иванчик А.В.* Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2016. Т. 52. № 5. С. 609–617.
 57. *Коротаев Г.К.* Бароклинный слой моря: от теории Линеикина до оперативной океанографии // *Современные проблемы динамики океана и атмосферы. Сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П.С. Линеикина. М.: ТРИ-АДАЛТД,* 2010. С. 79–97.
 58. *Ferrari R., Wunsch C.* Ocean circulation kinetic energy: Reservoirs, sources, and sinks // *Annual Review of Fluid Mechanics.* 2009. № 41. P. 253–282.

Numerical Simulation of Ocean Circulation with Ultra-High Spatial Resolution

G. K. Korotaev^{1, *} and V. P. Shutyaev^{1, 2, **}

¹*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Kapitanskaya, 2, Sevastopol, 299011 Russia*

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

**e-mail: gkorotaev@gmail.com*

***e-mail: shutyaev@inm.ras.ru*

The paper provides an overview of publications related to the study of submesoscale ocean variability. The significant progress in understanding the role of submesoscale processes in ocean circulation formation, ocean-atmosphere interactions, including modulation of the heat and gas exchange, and their impact on the flux of biogenic elements in the top layer of the ocean achieved recently. There is a need to conduct a study of submesoscale ocean variability in order to improve the quality of short-term marine forecasts. The basis of the marine forecasts of the new level will be models with ultra-high spatial resolution, which allow to describe the reverse cascade of energy in the submesoscale range. New instruments capable of conducting 2–10 km surface observations of the seas and oceans will be launched in the next five years. The possibility of using the Black Sea as a testing area for the development of numerical circulation models with a resolution of no less than a kilometer and methods of assimilation of observational technologies of the next generation is discussed.

Keywords: numerical modelling, super high resolution, submesoscale variability, data assimilation, Black Sea polygon