



Оценки бюджета доступной потенциальной энергии в черном море при использовании новых схем аппроксимации уравнений адвекции-диффузии тепла и соли¹

Демышев С.Г., Дымова О.А.

ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», Севастополь

Введение

Мезомасштабные вихри и течения представляют собой водные динамические объекты, обеспечивающие вертикальный и горизонтальный обмен импульсом, теплом и веществом в океанах и морях. В современных условиях численное моделирование является основным инструментом их анализа и прогноза. Но несмотря на значительные достижения в этой области точность воспроизведения мезо- и субмезомасштабных процессов недостаточно высока, особенно при длительных расчетных периодах. Один из путей решения этой проблемы — построение численных уравнений гидродинамики и энергетики океана, обладающих рядом инвариантов. В соответствии с современными представлениями наличие законов сохранения в дискретной задаче обеспечивает правильное описание физи-

ческих процессов и повышает устойчивость разностной схемы.

Доступная потенциальная энергия (ДПЭ) является главным источником энергии мезомасштабных вихрей [1] в океанах и морях, уравнение бюджета которой описывает роль основных сил в динамике моря. Точность расчета дискретного уравнения для ДПЭ, соответствующего численной постановке, обеспечивает адекватность выводов о физических механизмах исследуемых процессов. В работе [2] предложена схема аппроксимации уравнения скорости изменения доступной потенциальной энергии, в точности соответствующая конечно-разностной постановке. В [3] описаны новые схемы аппроксимации уравнений адвекции-диффузии тепла и соли, обеспечивающая сохранение температуры и солености в любой конечной степени. В настоящей работе выполнен расчет уравнения бюджета доступной потенциальной энергии с целью проанализировать пространственную структуру основных энергетических потоков и провести сопоставление с результатами предыдущих расчетов, использующих традиционную аппроксимацию уравнений адвекции-диффузии тепла и соли.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-27-00141.

Материалы и методы

Анализ энергетики проведен на примере моделирования циркуляции Черного моря в 2016 г. Численные эксперименты выполнены на основе вихреразрешающей модели Морского гидрофизического института с разрешением 1,6 км. В модели учитывалось реалистичное атмосферное воздействие по данным реанализа ERA5, климатический сток и водообмен через проливы, проводилась ас-

симляция спутниковых данных о температуре поверхности моря. При идентичных настройках модели проведено для эксперимента по реконструкции циркуляции и расчету бюджета энергии с использованием традиционной

$$T_{i+1/2,j,k} = \overline{T_{i+1/2,j,k}}^x, \quad S_{i+1/2,j,k} = \overline{S_{i+1/2,j,k}}^x \quad (1)$$

и уточненной

$$S_{i+1/2,j,k} = \frac{4 S_{i+1,j,k}^4 + S_{i+1,j,k}^3 S_{i,j,k} + S_{i+1,j,k}^2 S_{i,j,k}^2 + S_{i+1,j,k} S_{i,j,k}^3 + S_{i,j,k}^4}{5 S_{i+1,j,k}^3 + S_{i+1,j,k}^2 S_{i,j,k} + S_{i+1,j,k} S_{i,j,k}^2 + S_{i,j,k}^3} \quad (2)$$

$$T_{i+1/2,j,k} = \frac{4 T_{i+1,j,k}^2 + T_{i+1,j,k} T_{i,j,k} + T_{i,j,k}^2}{5 T_{i+1,j,k} + T_{i,j,k}}$$

записи разностных операторов в уравнениях адвекции-диффузии тепла T и соли S . Формулы (1) и (2) приведены для координаты x (для y, z аналогично). Разница между экспериментами состоит в том, что в эксперименте (1) сохранялись T, S и T^2, S^2 ; в эксперименте (2) — T, S и T^3, S^5 .

Валидация результатов моделирования выполнена на основе контактных измерений температуры и солёности буями-профилемерами ARGO и в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2016 г. Оценки точности модельных термоалинных характеристик показали, что схемы аппроксимации уравнений адвекции-диффузии тепла и соли, обеспечивающие сохранение прогностических параметров в степени больше двух, улучшают точность воспроизведения солёности Черного моря в верхнем 100-м слое в течение всего года, толщины верхнего перемешанного слоя в зимний период и глубины залегания верхней границы слоя скачка тем-

пературы летом в центральной части моря.

Результаты

По результатам двух экспериментов рассчитаны ДПЭ и составляющие ее бюджета: работа силы плавучести (WRG), адвекция (ADV), вертикальная (DIFV) и горизонтальная (DIFH) диффузия APE в 2016 г. Для всего периода интегрирования средняя по объему ДПЭ в эксперименте 2 превышает примерно в 1,5 раза значения эксперимента 1. Анализ изменения со временем компонентов бюджета ДПЭ показал, что в летний сезон увеличение ДПЭ связано с уменьшением потерь энергии за счет горизонтальной диффузии, а зимой — вследствие уменьшения интегрального вклада работы силы плавучести и потерь за счет адвекции ДПЭ.

Пространственный анализ диффузионной компоненты бюджета энергии летом показал, что в эксперименте 2 (Рис. 1б) наблюдается ослабление

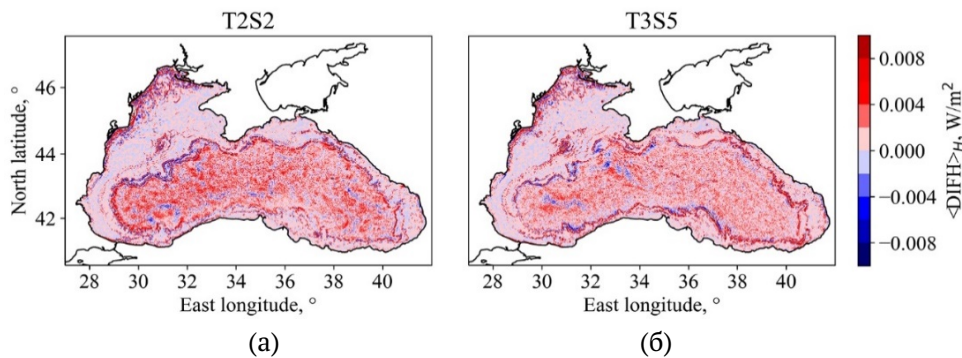


Рис. 1. Пространственное распределение проинтегрированной по вертикали компоненты DIFH по результатам экспериментов 1 (а) и 2 (б) 15 июня 2016 г.

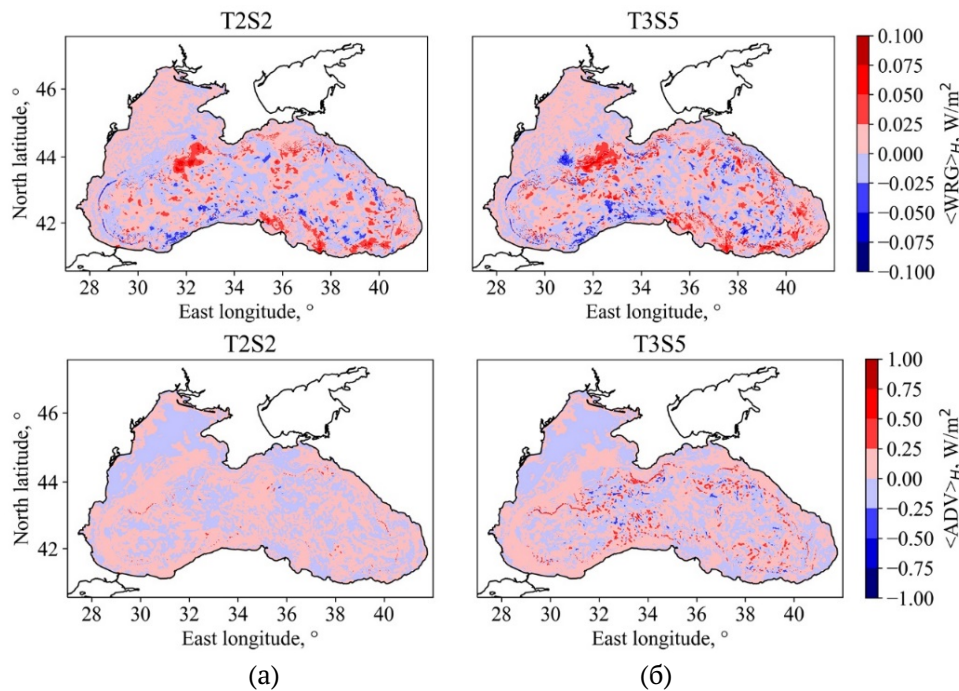


Рис. 2. Пространственное распределение проинтегрированных по вертикали компонент WRG и ADV по результатам экспериментов 1 (а) и 2 (б) 15 декабря 2016 г.

горизонтальной диффузии в прибрежной зоне на Северо-западном шельфе (СЗШ) и в глубоководной части моря. При этом пространственное распределение термохалинных характеристик свидетельствует об уменьшении горизонтальных градиентов T и S на СЗШ, а следовательно, и об уменьшении вклада горизонтальной диффузии в бюджет энергии. Ослабление диффузии в центральной части связано с более однородным пространственным распределением поля плотности в глубинных слоях.

Пространственный анализ проинтегрированных по вертикали компонентов бюджета ДПЭ зимой показал, что наибольшие отличия между экспериментами наблюдаются в центральной части и над свалом глубин. По данным эксперимента 2 в западной части моря усиливается преобразование кинетической энергии в потенциальную ($WRG < 0$), а зоны отрицательных и экстремальных значений адвекции ДПЭ увеличиваются (Рис. 2б).

Для летнего и зимнего периодов также получена разница в изменении по глубине запаса ДПЭ для двух экспериментов. Так летом, в верхнем 40-метровом слое средняя ДПЭ выше в эксперименте 1, а начиная с глубин 50 м — в эксперименте 2, достигая максимума на глубине 700 м. Анализ изменения по глубине средней на горизонтах ДПЭ зимой показал, что в отличие от летнего сезона

энергия в эксперименте 1 выше, чем в 2 в слое 50–100 м. На глубоководных горизонтах изменчивость ДПЭ аналогична летнему периоду с увеличением разницы между результатами экспериментов почти в 2 раза.

Обсуждение

Основная причина отличий в результатах расчетов ДПЭ и ее бюджета — это разница в полях плотности морской воды. Сравнительный анализ пространственного распределения полей ДПЭ и аномалии плотности летом показал, что в верхнем слое ДПЭ меньше в эксперименте 2 вследствие уменьшения величины модуля аномалии плотности на СЗШ. Для зимнего сезона получено, что в эксперименте 2 в западной части моря обширные области повышенных значений ДПЭ соответствуют антициклоническим вихревым образованиям с отрицательными аномалиями плотности. На горизонтах ниже 100 м в течение всего года увеличение ДПЭ связано с ростом аномалий плотности на периферии бассейна вследствие интенсификации мезомасштабных антициклонов.

Валидация результатов моделирования показала, что использование схем аппроксимации, сохраняющих температуру и соленость в степени больше двух, позволяет уточнить поле плотности в верхнем слое Черного моря, а следовательно, и

более точно рассчитать энергетические компоненты системы. В энергетическом аспекте обеспечение высокой степени инвариантности дискретных уравнений адвекции-диффузии тепла и соли приводит к уменьшению диссипации доступной потенциальной энергии. Результаты работы важны для анализа механизмов эволюции мезомасштабных вихрей на основе оценки энергетических вкладов таких физических процессов как диссипация, неустойчивость, работа сил плавучести и давления.

Список литературы

- [1] Гилл А. Динамика атмосферы и океана. В 2 т. М.: Мир, 1986. Т. 2. 415 с.
- [2] Демышев С.Г. Дискретное уравнение для доступной потенциальной энергии как точное следствие конечно-разностных уравнений модели динамики моря // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38(3). С. 239–255.
- [3] Демышев С.Г. Нелинейные инварианты дискретной системы уравнений динамики моря в квазистатическом приближении // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, №5.