

РЕЦЕНЗИЯ №1

на статью **«ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПРИ ДОМИНИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЙ РАЗНЫХ МАСШТАБОВ»** авторского коллектива: С. Г. Демышев, О. А. Дымова, Н. А. Миклашевская

В статье приведены результаты моделирования динамики вод Черного моря для двух периодов, характеризующихся различными режимам циркуляции вод (2011 и 2016 гг.). Численные эксперименты проведены с помощью модели МГИ при учете атмосферного форсинга SKIRON. Оценена сезонная изменчивость динамических и термохалинных полей, а также кинетической и доступной потенциальной энергии, скорости их преобразования. Установлено, что в 2011 г. Основное черноморское течение (ОЧТ) было достаточно когерентным, а мезомасштабные вихри в основном наблюдались над континентальным склоном, тогда как в 2016 г. «целостное» ОЧТ наблюдалось только в северной части бассейна, а мезомасштабные вихри доминировали в центральной и южной частях моря. Показано, что в изменчивости средней кинетической энергии в течение года проявляется сезонный сигнал. При этом его амплитуда зависит от скорости течения, которая выше в режиме доминирования ОЧТ. Распределение средней доступной потенциальной энергии носит преимущественно сезонный характер. Вихревая кинетическая энергия зависит как от режима циркуляции (доминирование ОЧТ, или мезомасштабных вихрей), так и от времени года. Зимой генерация мезомасштабных вихрей происходит вследствие передачи энергии от ветра и от среднего течения через механизм баротропной неустойчивости. Летом при ослаблении ветровой активности мезомасштабная изменчивость поддерживается вкладами баротропной и, преимущественно, бароклинной неустойчивости.

Результаты, полученные в работе с помощью численного моделирования, в определенной степени согласуются с аналогичными результатами, полученными путем обработки данных натурных наблюдений (контактных и дистанционных) а также лабораторного моделирования. Следует весьма положительно оценить «энергетический» подход к исследованию пространственно-временной изменчивости физических процессов в Черном море. Этот подход имеет фундаментальное значение и его использование позволяет получить оценки потенциальной и кинетической энергии в Черном море для различных пространственно-временных масштабов и изучить передачу энергии от одних масштабов к другим.

Статья, безусловно, представляет интерес для опубликования в журнале «Океанологические исследования». Представленные в ней результаты обладают научной новизной и физической значимостью.

Вместе с тем, имеется некоторые недостатки, на устранение которых авторам следует обратить внимание.

1. *Название статьи* желательно откорректировать. Терминология «бассейновый» и «вихревой» режим циркуляции не является общепринятой в океанологии. Понятно, что авторы имеют в виду, но, тем не менее, лучше написать, например, так: «...в режимах доминирования общесейновой циркуляции и мезомасштабной вихревой динамики». Ибо в чистом виде ни тот, ни другой режим, на практике не реализуются.

2. *Введение, стр. 3, последняя фраза первого абзаца:* «Оценке влияния изменчивости атмосферных условий на структуру циркуляции Черного моря и ее энергетические характеристики посвящен ряд работ, где представлены как результаты моделирования (Stanev, 1990; Staneva et al., 2001; Oguz et al., 1995; Knysh et al., 2001; Korotaev et al., 2003; Дорофеев, Сухих, 2016), так и данные обработки наблюдений (Korotaev et al., 2003; Menna, Poulain, 2014)». Здесь отсутствуют ссылки на некоторые работы, внесшие значимый вклад в развитие представлений о взаимодействии бассейновой циркуляции и вихревой динамики в

Черном море, а также их зависимости от атмосферного воздействия (завихренности напряжения трения ветра), такие как:

1) Zatsepin A. G., Ginzburg A. I., Kostianoy A. G. et al. (2002) Variability of water dynamics in the northeastern Black Sea and its effect on the water exchange between the near-shore and off-shore parts of the basin // *Oceanology*, Vol. 42, Suppl. 1, 2002, pp. S1–S15;

2) Zatsepin A.G., Denisov E.S., Emelyanov S.V. et al. (2005) Effect of bottom slope and wind on the near-shore current in a rotating stratified fluid: laboratory modeling for the Black Sea // *Oceanology*. V. 45. Suppl. 1. P. S13-S26.

3) Kubryakov, A. A., & Stanichny, S. V. (2015) Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // *Deep-Sea Res.* 1, 97, 80-91;

4) Kubryakov, A. A., Stanichny, S. V., Zatsepin, A. G., & Kremenetskiy, V. V. (2016) Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // *Journal of Marine Systems*, 163, 80-94;

3. *Раздел «Данные и методы», стр. 6, первый абзац:* «Ранее было показано, что одним из основных факторов, определяющих режим циркуляции Черного моря, является ветровое воздействие (Oguz et al., 1995; Staneva, Stanev, 1998; Stanev, Staneva, 2000; Korotaev et al., 2003; Дорофеев, Сухих, 2016).» Этому аспекту были посвящены также работы 1) – 4) из указанных в предыдущем пункте рецензии.

4. *Раздел «Данные и методы», стр. 6, первый абзац:* «Поэтому в настоящей работе основное внимание уделено процессам преобразования энергии за счет работы силы плавучести и неустойчивости». В силу определения вихревой кинетической энергии через квадрат пульсаций скорости течения, как ветровая накачка циркуляции, так и ее диссипация из-за трения, могут служить важным фактором изменения ЕКЕ. При этом вихреобразование, вследствие неустойчивости течения, может вовсе отсутствовать на фоне пульсаций скорости общебассейновой циркуляции, обусловленных вышеуказанным фактором (накачкой и диссипацией). Если он исследовался ранее, представляется важным указать его вклад наряду с баротропной и бароклинной неустойчивостью. Не окажется ли он доминирующим?

5. Более правильная оценка вихревой энергии ЕКЕ возможна при «прямом» подсчете кинетической энергии вихрей, как это делалось, например, в 3). Там, в частности, было установлено, что кинетическая энергия мезомасштабных антициклонов в среднем составляет одну седьмую часть МКЕ, а циклонов – еще меньшую ее долю. В данной работе, почему-то МКЕ (рис. 3) и ЕКЕ (рис. 4) построены в разных шкалах (а надо бы в одной). Но, похоже, что они имеют сопоставимые величины. Так ли это?

6. В системе уравнений (1) присутствуют средние и пульсационные значения скорости и аномалии плотности, но в тексте, поясняющем (1), ничего не сказано, как эти средние и пульсации определялись. На каком пространственном масштабе производилось осреднение? На масштабе расчетной ячейки? Почему в качестве временного масштаба осреднения был избран один месяц? Как пространственно-временные масштабы осреднения влияют на конечный результат? Надо хотя бы обсудить эти вопросы и устранить этот изъян. Кроме того, в уравнении, определяющем параметр ВТ, фигурирует фиктивная плотность $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$. Зачем это надо? Ведь можно вместо нее использовать ρ_{ref} . При этом различие не превысит полутора процентов.

7. Весомый вклад в бароклинность – ВС (см. (1)), может вносить береговой сток, значительно увеличивающий поперечный берегу градиент плотности, по крайней мере, в верхнем 20 м слое. Однако этот фактор не обсуждается. Почему?

8. Часто в статье употребляется словосочетание «скорости течений». Скорость (как и энергия, и температура) – физическая величина и ее желательно употреблять в единственном числе, равно как и «течение», если речь не идет о поименованных течениях в Мировом океане, например, «Западных пограничных течениях».

Со статьей хотелось бы ознакомиться вторично после устранения недостатков.

Подпись. Рецензент №1. 20.07.2022.

От редакции: рецензия была направлена редакцией авторскому коллективу.

Ответ рецензенту №1 на Рецензию от 20.07.2022 г. на статью авторского коллектива: С. Г. Демьшев, О. А. Дымова, Н. А. Миклашевская «ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПРИ ДОМИНИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЙ РАЗНЫХ МАСШТАБОВ».

Авторы выражают глубокую благодарность Рецензенту за ценные замечания, способствовавшие улучшению содержания и представления результатов. Мы учли все замечания, наши правки в тексте отмечены желтым цветом. Ниже представлены развернутые ответы.

Рецензент: 1. Название статьи желательно откорректировать. Терминология «бассейновый» и «вихревой» режим циркуляции не является общепринятой в океанологии. Понятно, что авторы имеют в виду, но, тем не менее, лучше написать, например, так: «...в режимах доминирования общеприбрежной циркуляции и мезомасштабной вихревой динамики». Ибо в чистом виде, ни тот, ни другой режим на практике не реализуются.

Ответ: замечание учтено, название изменено.

С замечанием согласны. В тексте используемые термины взяты в кавычки, также добавлены некоторые комментарии и уточнения, отмеченные Рецензентом, строки 79–81.

Рецензент: 2. Введение, стр. 3, последняя фраза первого абзаца: «Оценке влияния изменчивости атмосферных условий на структуру циркуляции Черного моря и ее энергетические характеристики посвящен ряд работ, где представлены как результаты моделирования (Stanev, 1990; Staneva et al., 2001; Oguz et al., 1995; Knysh et al., 2001; Korotaev et al., 2003; Дорофеев, Сухих, 2016), так и данные обработки наблюдений (Korotaev et al., 2003; Menna, Poulain, 2014)». Здесь отсутствуют ссылки на некоторые работы, внесшие значимый вклад в развитие представлений о взаимодействии прибрежной циркуляции и вихревой динамики в Черном море, а также их зависимости от атмосферного воздействия (завихренности напряжений трения ветра), такие как:

1) Zatsepin A. G., Ginzburg A. I., Kostianoy A. G. et al. (2002) Variability of water dynamics in the northeastern Black Sea and its effect on the water exchange between the near-shore and off-shore parts of the basin // *Oceanology*, Vol. 42, Suppl. 1, 2002, pp. S1–S15;

2) Zatsepin A.G., Denisov E.S., Emelyanov S.V. et al. (2005) Effect of bottom slope and wind on the near-shore current in a rotating stratified fluid: laboratory modeling for the Black Sea // *Oceanology*. V. 45. Suppl. 1. P. S13-S26.

3) Kubryakov, A. A., & Stanichny, S. V. (2015) Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // *Deep-Sea Res.* 1, 97, 80-91;

4) Kubryakov, A. A., Stanichny, S. V., Zatsepin, A. G., & Kremenetskiy, V. V. (2016) Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // *Journal of Marine Systems*, 163, 80-94.

Ответ: замечание учтено, ссылки добавлены в текст (строки 67–69, 93–94, 99, 201–202 и др.) и список литературы [15, 16, 31, 32].

Рецензент: 3. Раздел «Данные и методы», стр. 6 первый абзац: «Ранее было показано, что одним из основных факторов, определяющих режим циркуляции Черного моря, является ветровое воздействие (Oguz et al., 1995; Staneva, Stanev, 1998; Stanev, Staneva, 2000; Korotaev et al., 2003; Дорофеев, Сухих, 2016).» Этому аспекту были посвящены также работы 1) – 4) из указанных в предыдущем пункте рецензии.

Ответ: замечание учтено, ссылки добавлены в текст (строки 198–202) и список литературы.

Рецензент: 4. Раздел «Данные и методы», стр. 6 первый абзац: «Поэтому в настоящей работе основное внимание уделено процессам преобразования энергии за счет работы силы плавучести и неустойчивости». В силу определения вихревой кинетической энергии, через квадрат пульсаций скорости течения, как ветровая накачка циркуляции, так и ее диссипация из-за трения могут служить важным фактором изменения ЕКЕ. При этом вихреобразование вследствие неустойчивости течения может вовсе

отсутствовать на фоне пульсаций скорости общебассейновой циркуляции, обусловленных вышеуказанным фактором (накачкой и диссипацией). Если он исследовался ранее, представляется важным указать его вклад наряду с баротропной и бароклинной неустойчивостью. Не окажется ли он доминирующим?

Ответ: замечание учтено.

По абсолютным значениям среднегодовые генерационные (ветровая накачка) и диссипационные компоненты бюджета ЕКЕ превышают конверсионные компоненты на 1–2 порядка (как, например, показано в Demyshev, Dymova, 2022, рис. 6). Однако ветровая генерация и диссипация энергии – это два процесса, действующих в противоположном направлении. В контексте энергетического цикла Лоренца, когда совместно рассматриваются интегральные оценки, поток энергии, оставшийся после взаимной компенсации работы силы ветра за счет внутреннего трения, соизмерим с потоками, возникающими вследствие преобразования одного вида энергии в другой через неустойчивость течений. Эти выводы были получены нами при оценке среднегодовых энергетических циклов в Черном море (Demyshev, Dymova, 2022), а также при анализе энергетики Севастопольского антициклона (Demyshev, Dymova, 2018). В последней работе сопоставлялись непосредственно скорости ветровой генерации и скорости конверсии ЕКЕ и получено, что при ослаблении ветра энергетические вклады за счет неустойчивости доминируют (рис. 10 Demyshev, Dymova, 2018).

Соответствующие комментарии добавлены в текст, строки 202–210.

Рецензент: 5. Более правильная оценка вихревой энергии ЕКЕ возможна при «прямом» подсчете кинетической энергии вихрей, как это делалось, например, в 3). Там, в частности, было установлено, что кинетическая энергия мезомасштабных антициклонов в среднем составляет одну седьмую часть МКЕ, а циклонов – еще меньшую ее долю. В данной работе, почему-то МКЕ (рис.3) и ЕКЕ (рис.4) построены в разных шкалах (а надо бы в одной). Но, похоже, что они имеют сопоставимые величины. Так ли это?

Ответ: замечание учтено.

Мы согласны с Рецензентом, что прямой расчет вихревой энергии через орбитальные скорости вихрей (как в работе Kubryakov, Stanichny, 2015) дает более адекватные оценки ЕКЕ, однако при таком подходе затруднительно количественно оценить конверсию энергии внутри системы. В данной работе формально ЕКЕ есть энергия пульсаций скорости течения и параметры ВТ, ВС, ВW рассчитаны через эти пульсации. Но следуя общепринятой (хотя и не совсем точной терминологии), мы называем ЕКЕ вихревой энергией. В работе получено, что энергия пульсаций скорости сопоставима со средней кинетической энергией и даже превышает ее в теплый сезон 2016 г. Наши результаты не противоречат результатам других авторов, использующих аналогичную методику, например, для модельного бассейна (Holland, Lin, 1975), в Мировом океане (Von Storch et al., 2012), в Красном море (Zhan et al., 2016).

Соответствующие комментарии добавлены в текст: строки 229–232, 469–477.

Рецензент: 6. В системе уравнений (1) присутствуют средние и пульсационные значения скорости и аномалии плотности, но в тесте, поясняющем (1), ничего не сказано, как эти средние и пульсации определялись. На каком пространственном масштабе производилось осреднение? На масштабе расчетной ячейки? Почему в качестве временного масштаба осреднения был избран один месяц? Как пространственно-временные масштабы осреднения влияют на конечный результат? Надо хотя бы обсудить эти вопросы и устранить этот изъян. Кроме того, в уравнении, определяющем параметр ВТ, фигурирует фиктивная плотность $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$. Зачем это надо? Ведь можно вместо нее использовать ρ_{ref} . При этом различие не превысит полутора процентов.

Ответ: замечание учтено.

Расчет параметров МКЕ, ЕКЕ, МРЕ, ЕРЕ, ВТ, ВС и ВW выполнен в каждой ячейке сетки по модельным полям плотности и скорости течений. Для каждого месяца 3D массивы плотности и скорости были усреднены по времени, затем на каждые сутки в каждой точке сетки рассчитаны отклонения от среднемесячных значений. Эти величины подставлялись в формулы (1). В данной работе интервал осреднения по времени соответствовал 1 месяцу (с учетом количества дней) и был выбран с целью оценить сезонную изменчивость исследуемых параметров. Увеличение интервала осреднения по времени приведет к

сглаживанию полей скорости и плотности и уменьшению пиковых значений параметров. В зависимости от поставленной задачи (например, оценка межгодовой изменчивости или оценка энергетики квазистационарных состояний) интервал осреднения увеличивают до 1 года и более. В методике Лоренца обычно не используют интервал осреднения меньше месяца, т.к. методика разработана для исследования крупно- и мезомасштабной динамики. Соответствующие комментарии добавлены в текст: строки 238–247.

В формулах (1) фигурирует ρ_0 , т.к. уравнения (1) выводятся из уравнений сохранения количества движения (см. например Von Storch et al., 2012). Возможно, при замене ρ_0 на ρ_{ref} результаты изменятся незначительно, но данное предположение требует проверки, выходящей за рамки этой работы. Использованные в работе формулы взяты из других источников, на что мы указываем в ссылках (строка 217). Соответствующие комментарии добавлены в текст: строки 191–195.

При визуализации результатов была выбрана форма пространственно-временных диаграмм (рис. 4 и 5), где среднемесячные 3D массивы МКЕ, ЕКЕ, МРЕ, ЕРЕ, ВТ, ВС и ВВ усреднялись по площади каждого модельного слоя (строки 308–311). Это позволило оценить сезонное изменение параметров с глубиной. Горизонтальные распределения энергетических характеристик по результатам этих экспериментов представлены в работе, находящейся в печати.

Рецензент: 7. *Весомый вклад в бароклинность – ВС (см. (1)), может вносить береговой сток, значительно увеличивающий поперечный берегу градиент плотности, по крайней мере, в верхнем 20 м слое. Однако этот фактор не обсуждается. Почему?*

Ответ: замечание учтено.

Мы согласны, что береговой сток – это один из важных факторов, определяющих градиенты плотности особенно в прибрежной зоне. На диаграммах 4, 5 и 7 показаны скорости преобразования энергии и распределение термохалинных характеристик, полученные путем осреднения для каждого модельного слоя во всем бассейне, и такая форма представления не позволяет выделить береговой сток. Работу по исследованию влияния берегового стока на запас ДПЭ, изменчивость потоков плавучести и бароклинную продукцию планируется опубликовать в ближайшее время. В соответствии с замечанием комментарии по этому вопросу добавлены в Обсуждение, строки 511–516.

Рецензент: 8. *Часто в статье употребляется словосочетание «скорости течений». Скорость (как и энергия, и температура) – физическая величина и ее желательно употреблять в единственном числе, равно как и «течение», если речь не идет о поименованных течениях в Мировом океане, например, «Западных пограничных течениях».*

Ответ: с замечанием согласны частично.

В тексте исправлены те словосочетания, где «скорость» употребляется во множественном числе. На наш взгляд в контексте данной работы использовать единственное число слова «течение» для описания динамики во всем бассейне не совсем корректно, т.к. часто потоки в разных частях бассейна не связаны между собой общими траекториями движения частиц жидкости. Там, где речь идет об абстрактном движении жидкости, мы исправили на «скорость течения». Там, где речь идет о модельных результатах, используется «скорость течений».

С уважением, автор. 12.08.2022.

От редакции: ответ и доработанная версия статьи были направлены редакцией рецензенту.

Подтверждение Рецензента №1 на публикацию:

Авторы существенно доработали статью с учетом подавляющего большинства сделанных замечаний. В настоящем виде считаю возможным рекомендовать ее к публикации в журнале Океанологические исследования без дополнительной доработки.

Подпись. Рецензент №1. 13.08.2022.