

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Кубрякова Арсения Александровича «Изменчивость динамики вод Черного моря на сезонных и межгодовых масштабах и её влияние на морскую экосистему», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.17 – океанология

Представленная работа посвящена исследованию изменчивости динамических процессов в Черном море, их влияния на горизонтальный и вертикальный обмен и особенности функционирования экосистемы бассейна на сезонных и межгодовых масштабах. Рассматривается большой набор задач, включая:

- 1) изучение пространственного распределения, сезонной и межгодовой изменчивости характеристик вихрей Черного моря и их влияние на стратификацию, термохалинную структуру вод, транспорт тепла и соли;
- 2) изучение механизмов изменчивости и взаимодействия крупномасштабной и вихревой динамики Черного моря на сезонных и межгодовых масштабах;
- 3) изучение влияния крупномасштабных и вихревых процессов и дрейфовых течений на распространение шельфовых вод и изменчивость распределения концентрации хлорофилла А в Черном море;
- 4) изучение сезонной и межгодовой изменчивости вертикального распределения концентрации хлорофилла А, показателя обратного рассеяния, фотосинтетически активной радиации (ФАР), коэффициента ослабления света;
- 5) изучение влияния освещенности, динамического и атмосферного воздействия на цветение фитопланктона.

Актуальность темы и поставленных задач обусловлена необходимостью расширения знаний о механизмах формирования и изменчивости характеристик мезомасштабных вихрей, влиянии крупномасштабной и вихревой динамики на термохалинную структуру вод и адвекцию антропогенных загрязнений и природных примесей в Черном море. Такое исследование необходимо для понимания причин современных изменений гидрологической структуры и экосистем Черного моря в условиях меняющегося климата и валидации численных био-физико-химических моделей для мониторинга и долгосрочного прогноза изменений в морских экосистемах.

Работа выполнена на высоком научном уровне, с использованием самых разных методов наблюдения и моделирования, и безусловно вносит большой вклад в понимание разнообразных динамических процессов в Черном море. Автором получен ряд важных результатов, имеющих как научную, так и практическую значимость. Особое значение имеют следующие новые полученные результаты.

1. Проведен анализ статистических особенностей кинематических, геометрических и термохалинных характеристик мезомасштабных вихрей Черного моря в 1992–2011 гг. на основе алгоритма автоматической идентификации вихрей в альтиметрическом поле скорости.
2. Проведен анализ статистических трехмерных характеристик вихрей по данным численного моделирования за 2005–2016 гг. с разрешением 10 км с помощью метода автоматической идентификации вихрей на каждом расчетном горизонте.
3. Предложен механизм сезонной генерации антициклонов в Черном море.
4. Исследована сезонная и межгодовая изменчивость вертикального распределения концентрации хлорофилла А, показателей обратного рассеяния и показателя диффузного ослабления света на основе анализа измерений буев Био-Арго.
5. Показано, что малая толщина эвфотической зоны усиливают влияние атмосферного и гидродинамического воздействия на экосистему Черного моря.

Усиление экмановской накачки во время штормов приводит к подъему хемоклина и возникновению зон наибольшего цветения в крупномасштабных циклонических круговоротах и мезомасштабных циклонах. В мезомасштабных антициклонах, где хемоклин заглублен, рост концентрации хлорофилла А подавляется.

Недостатки проделанной работы.

- 1) На основе метода автоматической идентификации вихрей в альтиметрическом поле скорости проведен анализ статистических особенностей характеристик вихрей Черного моря и их пространственной изменчивости в 1992 – 2011 гг. Показано, что в Черном море наблюдается больше циклонических мезомасштабных вихрей, чем антициклонических. Прежде всего, отмечу неполноту этого исследования для докторской диссертации. Альтиметрическое поле скорости доступно до настоящего времени, и можно было бы провести идентификации вихрей после 2011 г., тем более она автоматическая. Хотелось бы видеть обоснование наблюдаемой асимметрии числа циклонов и антициклонов в таком замкнутом бассейне как Черное море. Такая асимметрия наблюдается и в др. районах Мирового океана, но, насколько мне известно, не в замкнутых бассейнах. Возможно, с увеличением периода наблюдения эта асимметрия изменится.
- 2) В Разделе 3 по спутниковым альтиметрическим измерениям приведены оценки вихревого переноса транспорта тепла и соли. Эти расчеты основаны на выделении замкнутых линий тока и оценки «радиуса» и «площади» вихря. По-существу это проблема идентификации границ ядра вихря, через которую затруднен транспорт тепла и соли, по крайней мере, благодаря чисто адвективным процессам. Эти методы не позволяют объективно определить границу ядра. Метод, используемый автором, как и большинство эйлеровых методов (критерий Окубо-Вейса, замкнутые контуры аномалий уровня и др.), субъективно определяют границы ядра и нет уверенности в том, что через эту границу не происходит обмена воды с окружающей средой. Как правило, они завышают размер и время жизни мезомасштабных вихрей (Wang, et al. The life cycle of a coherent Lagrangian Agulhas ring. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2016, 121, 3944 – 3954). Поэтому, если по этим критериям вычислить, например, тепло и соль, переносимые вихрями на большие расстояния, то оценки оказываются сильно завышенными (Abernathy, R., & Haller, G. (2018). Transport by Lagrangian vortices in the eastern pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 48(3), 667–685). Существует объективный лагранжев метод идентификации границ ядер когерентных вихрей на основе вычисления разности завихренности элемента жидкости вдоль ее траектории и мгновенной пространственно усредненной завихренности в объеме жидкости. Границы ядра вихря, переносящего соль и тепло без потерь, могут быть идентифицированы как самые внешние замкнутые контуры такой величины (Haller, G. et al. Defining coherent vortices objectively from the vorticity. *Journal of Fluid Mechanics* 2016, 795, 136–173).
- 3) В разд. 2, используя сумму геострофической и параметризованной дрейфовой скорости, разработаны лагранжевы методы расчета перемещения плавающих объектов. Эти методы применяются для изучения межгодовой изменчивости распространения дунайских вод в летний период. Показано, что распространение плюма в разные годы происходит по разным сценариям: захват вихрями, перенос в глубоководную западную часть бассейна, запираание плюма на шельфе. Таким образом, кросс-шельфовый обмен питательными веществами происходит по разным путям (транспортным коридорам). Схемы течений и расчет траекторий лагранжевых частиц, приведенные в работе, не позволяют выявить структуры, ответственные за такое различное поведение плюма. То же относится и к

распространению нефтяных пятен. Это можно сделать с помощью вычисления накопленного за определенное время показателя Ляпунова или других лагранжевых индикаторов (Prants, S.V., Uleysky, M.Y., Budyansky, M.V, 2017. Lagrangian oceanography: large-scale transport and mixing in the ocean. Berlin, New York. Springer Verlag.). Линии максимальных значений показателя Ляпунова определяют положение эволюционирующих во времени транспортных барьеров (лагранжевых фронтов), которые в свою очередь организуют поток, «притягивая» примесь и не позволяя ей пересекать барьер благодаря адвекции. Поскольку положение таких барьеров меняется медленнее поля скорости, то возникает возможность краткосрочного прогноза распространения антропогенных и природных загрязнений (см., напр., M.V. Budyansky et al. The impact of circulation features on the dispersion of radionuclides after the nuclear submarine accident in Chazhma Bay (Japan Sea) in 1985: A retrospective Lagrangian simulation. Marine Pollution Bulletin 2022, 177, 113483. S.V. Prants, et al. Lagrangian Oil Spill Simulation in Peter the Great Bay (the Sea of Japan) with a high-resolution ROMS model. Pure and Applied Geophysics. 2023. V.212. 102955).

Особо следует подчеркнуть уровень большинства научных журналов, в которых опубликованы основные результаты работы. Это ведущие отечественные журналы по океанологии и высокорейтинговые международные журналы: Progress in Oceanography, Journal of Geophysical Research: Oceans, Deep Sea Research Part I, Journal of Marine Systems, Remote Sensing, Ocean Science, Ocean Dynamics и др. Указанные недостатки не снижают общей научной ценности работы. Данная работа соответствует требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. (в редакции Постановления Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Кубряков Арсений Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.17 – океанология.



Пранц Сергей Владимирович
член корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий отделом физики океана и атмосферы
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский
океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской
академии наук
г. 690041 Владивосток, ул. Балтийская 43, Российская федерация
www.poi.dvo.ru
e-mail: prants@poi.dvo.ru раб.
тел.: +7(423)2312602

«22» августа 2023 г.

