

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию В.Н. Белокопытова «**КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЧЕРНОГО МОРЯ**», представленную на соискание ученой степени доктора географических наук по специальности 25.00.28 «Океанология»

Диссертационная работа Владимира Николаевича Белокопытова посвящена весьма подробному и всестороннему анализу структуры и изменчивости гидрофизических полей Черного моря в масштабах времени от сезонного до междекадного и векового на фоне происходящих изменений климата. В этих целях используются имеющиеся в распоряжении автора наиболее полные на сегодняшний день массивы исторических натуральных данных, включающие в себя, вероятно, почти все измерения, когда-либо выполненные на Черном море (около 180 тысяч гидрологических станций и порядка 6 миллионов отдельных измерений), а также наблюдения береговой гидрометеорологической сети и спутниковые данные. Столь значительный объем информационной базы сам по себе внушает уважение. Учитывая особую важность черноморского региона как в социально-экономическом отношении, так и в общем контексте глобальных климатических изменений, можно утверждать, что тема исследования представляет большой научный и практический интерес.

Диссертационная работа начинается с достаточно подробного обзора ранее выполненных исследований, начиная даже с античных времен (что для такого исторического объекта как Черное море полностью оправдано) и заканчивая публикациями самых последних лет (**Глава 1**). Следует отметить, что библиографическое обеспечение работы вообще является весьма обширным – список литературных источников насчитывает 470 наименований.

**Глава 2** посвящена описанию использованных данных, а также методов исследования. В ней весьма обстоятельно описан имеющийся массив данных судовых наблюдений, представлены распределения этих данных по районам моря, декадам, отдельным годам и сезонам, горизонтам глубины и другим категориям. Отдельно рассматриваются данные дрейферов и буев ARGO (причем для последних автором введены специальные поправки, корректирующие характерный для этих буев-профилемеров временной «дрейф» значений солёности), а также данные прибрежных гидрометеорологических станций, атмосферные реанализы и спутниковая информация. В результате синтеза всех этих данных, тщательного контроля их качества и приведения их посредством оптимальной интерполяции и затем использования ЭОФ на регулярную сетку



в пространстве (около 10 миль по горизонтали, 67 уровней глубины) и во времени (1 месяц, а для части массива 1 декада), автором была создана комплексная информационная система и собственный массив реанализа термохалинных полей Черного моря за период с 1923 по 2015 гг.

В **Главе 3** представлены результаты анализа основных факторов, формирующих сезонную и межгодовую изменчивость термохалинных полей в Черном море – это ветер и его завихренность, компоненты водного баланса и составляющие теплового баланса моря. В частности, показано, что если в изменчивости завихренности полей ветра, так же, как и теплового баланса, доминирует сезонный цикл, то для компонентов водного баланса моря межгодовая изменчивость является сопоставимой с сезонной или даже превышает ее. Установлены пространственные распределения изменчивости всех компонентов по акватории моря и их связи с атмосферными индексами, прежде всего с NAO. Существенным элементом новизны в данной работе является рассмотрение водного и теплового балансов для глубокого моря и для шельфа по отдельности и оценка обменов между шельфом и открытой частью моря.

**Глава 4**, содержащая большую часть результатов, называется «Сезонный цикл термохалинной структуры вод Черного моря» и представляет большой объем информации о годовом ходе термохалинных полей и о долгопериодных и междекадных изменениях характеристик этого годового хода. Конечно, сезонный цикл гидрофизических параметров в Черном море являлся предметом большого числа предыдущих исследований и публикаций. Однако, как справедливо отмечает автор, «повышение пространственного разрешения, как вертикального, так и горизонтального, позволило уточнить и детализировать характеристики сезонной изменчивости». Особое внимание уделено процессам формирования холодного промежуточного слоя вод (ХПС). Эта же глава содержит раздел 4.5 «Циркуляция вод». Здесь приведены оценки хода средней кинетической энергии течений в годовом цикле, рассмотрены внутригодовые изменения общей циркуляции моря в климатическом осреднении. Так, пожалуй, впервые в столь определенной форме высказан тезис о том, что суб-бассейновые круговороты Черного моря (более известные как «очки Книповича») существуют в среднем лишь с июня по декабрь, а в остальное время в море преобладает единый циклонический круговорот. Рассматриваются также синоптические вихри (в той мере, в какой это позволяет пространственно-временное разрешение использованных данных), в том числе квазистационарных антициклонов Черного моря – Севастопольского, Батумского и других. В частности, показано, что вклад таких вихрей в общую энергию течений максимален в летне-осенний период.



В **Главе 5** рассматривается многолетняя изменчивость гидрологического режима Черного моря. Здесь рассматриваются, в частности, тренды и междекадные режимные сдвиги, непосредственно связанные с изменениями климата. Делается вывод о том, что, в отличие от Мирового океана, долгопериодные изменения теплосодержания Черного моря представляют собой циклический процесс без выраженного однонаправленного тренда. Впрочем, это характерно лишь для верхнего 50-метрового слоя, тогда как в более глубоких слоях отмечен слабый, но значимый рост температуры. Определяющую роль в межгодовых изменениях теплосодержания играет интенсивность зимней конвекции — наиболее глубокие минимумы в теплосодержании верхнего слоя отмечались в ситуациях, когда суровые зимы следовали подряд в течение нескольких лет. Долгопериодные изменения солености приурочены к главному галоклину и характеризуются медленным, но устойчивым ростом солесодержания. В изменчивости верхнего слоя моря хорошо выражены междесятилетние и межгодовые колебания в диапазоне 2–5 и 10–12 лет, а для шельфовых областей выделяется также пик 20–25 лет.

В разделе **Заключение** подведены наиболее общие итоги работы, а также сформулированы рекомендации по применению результатов работы и дальнейшей разработке темы.

Работа, несомненно, выполнена на самом высоком научном уровне. Научная значимость результатов диссертации велика — поскольку в работе всесторонне проанализированы наиболее полные доступные на сегодняшний день данные по Черному морю, эти результаты, по-существу, выводят наши знания о гидрологическом режиме Черного моря на новый уровень. Все расчеты выполнены автором очень аккуратно, при тщательном выполнении всех необходимых методических требований, должном контроле качества данных и достоверности полученных количественных оценок. Работа логично структурирована, изложена хорошим литературным языком и иллюстрирована качественным и удобным для восприятия графическим материалом. Выводы хорошо аргументированы. В целом в работе виден научный «почерк» специалиста высшей квалификации и крупного знатока черноморской океанологии.

Можно, однако, высказать и некоторые критические замечания. Ниже они разбиты по главам.

#### Замечания к Главе 1:

1.1. Несмотря на то, что недостаточно изученные (по мнению автора) вопросы гидрологического режима Черного моря и изменчивости его термохалинных полей перечислены в обзорной главе (с. 49), автор предоставляет читателю самому определить, что именно данная диссертационная работа существенно добавляет к результатам ряда



ранее опубликованных работ, нацеленных на решение близких по содержанию задач и основанных на этих же или аналогичных исторических данных. В процессе чтения диссертации некоторые отличия становятся очевидными, но лучше было бы заранее оговорить это во вводном разделе работы.

1.2. На мой взгляд, в обзоре следовало уделить больше внимания исследованиям прибрежной зоны и шельфовых процессов. Понятно, что этот круг вопросов не является непосредственной темой диссертационного исследования соискателя, однако в морях вообще и в Черном море в особенности прибрежные явления и гидрологические процессы в глубоководной части тесно связаны между собой, поэтому хотя бы краткое обсуждение первых в их взаимосвязи со вторыми в обзорной главе могло бы усилить работу.

1.3. Это, конечно, частное замечание, но все-же: при обсуждении античных источников, содержащих научные сведения о Черном море (с. 29-30), один важный источник пропущен – это «Письма с Понта» Публия Овидия Назона (начало I века н.э.), где в Письме IV(10) Альбиновану дана довольно развернутая океанологическая характеристика Черного моря со вполне корректным на наш сегодняшний взгляд объяснением влияния речного стока на его стратификацию, а также ледовый режим.

#### Замечания к Главе 2:

2.1. При контроле качества исходных данных автор использует критерии, идея которых состоит в отбраковке значений, слишком сильно отличающихся от «нормы» (отклонение от климатического среднего на  $3\sigma$  или  $4\sigma$ , инверсия плотности более  $0.1 \text{ кг/м}^3$  между соседними горизонтами, и другие). Это вполне разумный подход, но нет ли опасности отфильтровать таким образом реально имевшие место аномалии, особенно когда речь идет, например, об исследовании синоптических вихрей? И почему были выбраны именно такие пороговые значения, а не другие?

2.2. Из описания процедуры построения авторского реанализа Черного моря остается не совсем ясным, каким образом учитывается и учитывается ли неравномерность распределения исходных данных по времени внутри месяца (или декады). Сам термин «реанализ» представляется в этом случае не совсем подходящим, поскольку он обычно предполагает сочетание интерполяции с использованием гидродинамической модели.

2.3. Итоговые массивы данных обладают пространственным разрешением около 10 миль. Вероятно, этого достаточно для решения большинства поставленных в работе задач. Но как быть с анатолийским, крымским и особенно кавказским шельфами, ширина которых оказывается по существу «подсеточной»? Некоторые из выводов диссертационной работы связаны с оценками изменчивости шельфовой водной массы и обменов между шельфом и



глубокой частью моря. Учитывались ли в этих расчетах узкие шельфы восточной части моря? Насколько существенна их роль?

#### Замечания к Главе 3:

3.1. Раздел 3.2 – При рассмотрении водного баланса никак не упоминается возможный сток в море подземных вод и, вообще, обмена вода-дно. Понятно, что этот компонент водного баланса, вероятно, гораздо меньше всех остальных, но не дают ли имеющиеся данные возможность как-то оценить его количественно? Аналогичный вопрос можно отнести и к тепловому балансу – какова роль в нем геотермального тепла? Считается, что именно геотермальная конвекция обеспечивает высокую вертикальную однородность слоев Черного моря глубже 1700 м, а если так, то поток тепла от дна должен играть заметную роль в тепловом балансе если не всего моря, то этих глубинных слоев.

3.2. Введенное на с. 119 и используемое далее в связи с уравнением (3.1) предположение о том, что роль речного стока ограничивается прибрежной водной массой (граница которой здесь - достаточно произвольно - определяется изохалиной 17.8 промилле) вызывает определенные возражения. Не приходится сомневаться в том, что значительная часть пресноводного стока, претерпевая по пути трансформации и перемешиваясь с морскими водами, так или иначе оказывается в конечном счете и в центральной части моря. Несколько искусственным выглядит и предположение о линейном характере убывания доли материковых вод при удалении от устьев “основных” рек. Понятно стремление автора каким-то образом “распределить” речной сток, корректно заданный только на границах, по всей площади акватории моря, чтобы можно было записать соотношения дифференциального водного баланса в любой точке. Однако я думаю, что в данном случае лучше вообще отказаться от этой процедуры.

#### Замечания к Главе 4:

4.1. О субдукции (с. 182 и далее): обычно под субдукцией вод понимается все-же физическое перемещение вниз по вертикальной оси. В уравнении на с. 182, использованном для расчета скорости субдукции, лишь третий член соответствует физической скорости, а первые два – перераспределению свойств по водной колонне в результате локального тепло- и солеобмена (первый член) или горизонтальной адвекции (второй член), но без всякого вертикального переноса массы. Правильно ли относить эти процессы к субдукции?

4.2. Частное замечание: на рисунке 4.59 изолинии динамической топографии, построенные с использованием спутниковой альтиметрии, в западной и восточной частях моря под почти прямым углом пересекаются с берегом. Конечно, такого не может быть. Реальные изолинии уровня (они же и линии тока геострофических течений) замыкаются у континентального склона, но это может происходить на коротких пространственных

масштабах. Отсюда возникают проблемы интерполяции и пространственного разрешения у границ моря, что еще раз возвращает нас к вопросу, поднятому выше в замечании 2.3.

Замечание к Главе 5:

5.1. На с. 247 автор пишет: «Принципиальных различий в характере многолетних колебаний температуры в прибрежной зоне и глубоководной части моря не выявлено, поэтому данные береговых станций можно считать пригодными для оценок изменчивости теплозапаса поверхностного слоя по всей акватории моря». На мой взгляд, это важное утверждение требует более тщательного обоснования.

В целом, считаю, что диссертация В.Н. Белокопытова заслуживает очень высокой оценки, и сделанные выше замечания эту оценку отнюдь не снижают. Высокое качество диссертационной работы и квалификация ее автора подтверждаются многочисленными публикациями результатов работы в рецензируемых журналах, в том числе изданиях из перечня ВАК. Работа и отдельные ее части докладывались на ряде конференций и совещаний, в том числе международных. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа В.Н. Белокопытова «*Климатические изменения гидрологического режима Черного моря*», представленная на соискание ученой степени доктора географических наук по специальности 25.00.28 «Океанология», полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора наук.

Официальный оппонент,

И.О. заместителя директора Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН,

доктор географических наук,

член-корреспондент РАН

адрес: 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д.36

тел. +7-499-124-5994

е-мэйл: peter@ocean.ru

Λ

Завьялов Петр Олегович