

На правах рукописи

Белокопытов Владимир Николаевич

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО
РЕЖИМА ЧЕРНОГО МОРЯ**

Специальность 25.00.28 – океанология

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора географических наук

Севастополь – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Морской гидрофизический институт РАН».

Официальные оппоненты:

Завьялов Петр Олегович, доктор географических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук», заместитель директора по Физическому направлению.

Игнатов Евгений Иванович, доктор географических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», профессор географического факультета.

Репина Ирина Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук», заведующая лабораторией взаимодействия атмосферы и океана.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова».

Защита состоится «19» декабря 2017 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 900.010.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2, малый конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте Института http://mhi-ras.ru/news/thesis_defense_201706061409.html.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор географических наук

Совга Елена Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Исследования климата – одно из наиболее приоритетных направлений в науках о Земле. Значительная роль океана, как неотъемлемой части глобальной климатической системы, неоспорима. Для государства, имеющего выход к внутренним и окраинным морям, важно иметь научно обоснованные представления о региональных особенностях океанологических процессов и предвидеть потенциальные природные изменения, влияющие на функционирование морехозяйственного комплекса и состояние морской экосистемы.

Черное море – самый большой в мире распресненный (солонатоводный) морской бассейн, являющийся вследствие узости и мелководности проливов, одним из наиболее обособленных от Мирового океана морей. Уникальность гидрологии моря связана с целым рядом характерных особенностей термохалинной структуры вод, из которых одно из ключевых — хорошо выраженный галоклин с высокими значениями вертикальной стратификации, что приводит к слабой вентиляции моря. Резкое расслоение моря на тонкий опресненный верхний слой и глубокий соленый слой обуславливают иной характер многолетней изменчивости океанологических параметров, чем в большинстве районов Мирового океана.

Черное море – одно из самых изученных морей Мирового океана, в нем проводились многочисленные морские экспедиции, ему посвящены сотни научных статей и десятки монографий различной направленности. Общие черты гидрологической структуры Черного моря известны с первой половины XX вв. по работам Ф.Ф. Врангеля, И.Б. Шпиндлера, Н.М. Книповича, далее они постоянно уточнялись, в частности, в обобщающих работах А.К. Леонова, Д.М. Филиппова, А.С. Блатова, В.С. Тужилкина. Вопросы, относящиеся к основной тематике диссертации — климатической изменчивости гидрологических полей — целенаправленно рассматривались в работах В.С. Тужилкина, А.Н. Косарева, Э.Н. Альтмана, И.Ф. Гертмана, В.Б. Титова, В.Г. Кривошея, А.Б. Полонского, Е.А. Ловенковой, И.Г. Шокуровой, Т. Oguz, А. Carot, А.В. Kara. Тем не менее, после более чем 100-летнего периода исследований, многие вопросы остаются открытыми. К ним можно отнести: особенности процессов зимнего конвективного перемешивания в различных климатических условиях, устойчивость сезонного хода термохалинной структуры вод на десятилетних масштабах, причины долгопериодных тенденций в постоянном пикноклине, характеристики водного, солевого баланса моря и водообмена через Босфор, степень влияния крупномасштабной атмосферной циркуляции на многолетние изменения гидрологического режима моря и др. Возросший в последнее десятилетие объем доступной океанографической и метеорологической информации, полученной, в том числе с помощью новых, современных измерительных средств, дает возможность рассмотреть климатическую изменчивость в Черном море на вековом временном интервале.

Цели и задачи диссертационной работы. Цель работы — оценка крупномасштабных изменений гидрологического режима Черного моря за 100-летний период и выявление внешних факторов, влияющих на формирование термохалинной структуры и циркуляции вод.

Задачи исследования:

- разработка методов и вычислительных технологий обработки разнородных океанографических данных в целях реконструкции термохалинных полей на длительном временном интервале;
- оценка внешних факторов, определяющих изменчивость гидрологической структуры верхнего слоя моря: ветрового воздействия, теплового и водного баланса на основе всех доступных источников гидрометеорологической информации;
- выявление многолетних изменений амплитудно-фазовых характеристик сезонных циклов температуры, солености и циркуляции вод;
- расчет статистических характеристик межгодовой, десятилетней и междесятилетней изменчивости термохалинной структуры и циркуляции вод для различных слоев моря;
- обобщение многолетней изменчивости аномалий тепло- и солезапаса бассейна в виде последовательности различных состояний гидрологического режима моря;
- выявление причин климатических изменений гидрологического режима Черного моря на основе анализа многолетних колебаний крупномасштабной циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском секторе, теплового и водного баланса бассейна.

Теоретическая и практическая значимость работы. Работа выполнялась в соответствии с планами научных исследований и прикладных тем Морского гидрофизического института РАН, а также международного сотрудничества в рамках следующих научно-исследовательских проектов:

- Проект 0827-2015-0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан-атмосфера-литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов», 2015–2017 гг.;
- Проект 1002-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и GRID-технологий», 2015–2016 гг.;
- Проект RFMEFI57714X0110 «Разработка методов и создание экспериментального образца системы мониторинга антропогенных воздействий на шельфовые зоны черноморского побережья Российской Федерации, включая Крымский полуостров, на основе спутниковых и контактных данных», 2015–2016 г.;
- Грант РФФИ № 15-05-00984 «Зимняя изопикническая субдукция как механизм интенсификации вертикальной турбулентной диффузии и вертикальной адвекции в деятельном слое Черного моря», 2015–2016 гг.;
- Грант РФФИ № 14-45-01640 «Географическое районирование квазистационарных синоптических вихрей в Черном море», 2014 г.;

- Грант РФФИ № 14-45-01028 «Моделирование циркуляции и процессов переноса загрязняющих примесей в Севастопольской бухте», 2014 г.;
- Project PERSEUS («Policy-oriented marine Environmental Research in the Southern European Seas»), 2012–2014 гг.;
- Project EnviroGRIDS («Building Capacity for a Black Sea Catchment Observation and Assessment System supporting Sustainable Development»), 2011–2013 гг.;
- Project ECOOP («European Coastal-shelf Sea Operational Observing and Forecasting System»), 2007–2009 гг.;
- Project SESAME («Southern European Seas: Assessing and modelling ecosystem changes»), 2007–2009 гг.;
- Project CRDF «Controls on the distribution and fluxes of redox species at the oxic/anoxic bottom of the Black Sea», 2005–2007 гг.;
- Project INTAS «Methane Budget for the oxic/anoxic water column of the Black Sea: data synthesis, parameterisation of biochemical transformations, numerical simulation», 2002–2004 гг.;
- Project INTAS «Dissemination of data on environmental characteristics using a CD-ROM based data management system for the Atlantic Ocean and the enclosed seas (Mediterranean Sea, Caspian Sea and the Aral Sea)», 2001–2003 гг.;
- Project NOAA ESDIM «Rescue of Black Sea hydrological data for regional classification and studies of seasonal and interannual variability», 2001–2003 гг.;
- Проекты Национальной академии наук Украины «Мониторинговые системы», «Атмосфера-океан», «Геокосмос», «Геоэко», «Катастрофы», «Информ-ресурс», «Природная среда», «Океанография», «Полигон», «Управление», 2008–2014 гг.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что при обобщении разномасштабной изменчивости гидрологического режима Черного моря были выделены основные региональные особенности реакции Азово-Черноморского бассейна на глобальные климатические тенденции и выявлены существенные различия характера многолетних изменений в поверхностных и глубинных слоях моря. Методическая значимость работы состоит в дальнейшем развитии математических методов ЭОФ-реанализа гидрофизических полей на основе натуральных данных и их реализации на длительном (вековом) временном интервале.

В качестве практического применения результатов диссертации рекомендуется использование новых оценок пространственно-временной изменчивости океанографических характеристик Черного моря при планировании океанологических и климатических исследований региона; при математическом моделировании природных процессов в Черном море; для контроля качества первичных данных, поступающих в информационные океанографические системы; для учета влияния условий морской среды на хозяйственную деятельность в Азово-Черноморском бассейне.

Разработанная автором «Географическая информационная система «Гидрометеорология Черного и Азовского морей»» используется в Севастопольском отделении ГОИН и в Севастопольской гидрометеорологической обсерватории Росгидромета (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616284 от 06.06.2017). Информационная система обработки и визуализации

междисциплинарной базы данных Средиземноморского бассейна реализована в международных проектах SESAME и PERSEUS. Компьютерная программа «Гидролог» для обработки рейсовых океанографических данных применяется во многих отечественных институтах океанологического профиля.

Результаты работы использовались при чтении лекций на географическом факультете в Черноморском филиале МГУ им. М.В. Ломоносова, на кафедре физики Севастопольского государственного университета, в аспирантуре Морского гидрофизического института РАН, в качестве методического пособия на кафедре океанологии МГУ им. М.В. Ломоносова.

Результаты расчетов климатических океанографических полей Черного моря были представлены в 4 атласах, за один из которых автор вместе с коллективом исследователей был удостоен Государственной премии по науке и технике Украины за 2011 г.

Методология и методы исследования. Основным методическим подходом выполненного диссертационного исследования являлся комплексный анализ разнородной океанографической и гидрометеорологической информации: контактных измерений (судовые съемки, дрейфующие буи, гидрометеорологическая сеть), дистанционных спутниковых измерений и массивов реанализа атмосферных и гидрофизических полей.

Для большей эффективности анализа материалов наблюдений была создана информационная система, включающая в себя набор используемых баз данных и авторское прикладное программное обеспечение, предназначенное для визуализации, контроля качества и коррекции данных, расчета необходимых параметров и статистических оценок.

В процессе исследования использовались различные математические методы: корреляционный, спектральный и гармонический анализ временных рядов, разложение на эмпирические ортогональные функции, оптимальная интерполяция, а также синоптический анализ, T,S-анализ и другие традиционные методы климатологии и океанографии.

Положения, выносимые на защиту:

– Новый метод реконструкции термохалинных полей, сочетающий в себе методы оптимальной интерполяции и методы разложения на ЭОФ-функции, позволил создать массив реанализа за весь исторический период наблюдений на основе использования архивных данных с различным пространственным разрешением;

– Основной причиной региональных отличий климатических изменений в Черном море от других районов Мирового океана является внутриматериковое положение моря, определяющее его изолированность, слабый внешний водообмен, двухслойность гидрологической структуры вод и повышенную реакцию бассейна на атмосферные воздействия;

– Различия характеристик сезонной и межгодовой изменчивости температуры и солености в Черном море связаны с изменением общей интенсивности и перераспределением относительной роли составляющих теплового и водного баланса;

– Многолетняя изменчивость термохалинных полей в верхнем 100-метровом слое моря с преобладанием междесятилетних колебаний резко отличается от тенденций в слое основного пикноклина и глубинных слоях, где поступление мраморноморских вод вызывает слабое, но устойчивое нагревание и осолонение. Ведущую роль в низкочастотной изменчивости теплозапаса моря играет интенсивность зимней конвекции;

– Основным внешним фактором, регулирующим переходы в различные состояния гидрологического режима в Черном море на междесятилетнем масштабе, является смена типов атмосферной циркуляции, где главную роль играет направление преобладающего переноса воздушных масс.

Научная новизна. Помимо защищаемых положений, новизной обладают следующие результаты диссертационной работы:

– Новое программное обеспечение для обработки океанографических данных, новые массивы реанализа термохалинных полей Черного моря и новые климатические массивы;

– Новые оценки статистических характеристик сезонной и межгодовой изменчивости температуры, солености, стратификации и вертикальной устойчивости вод;

– Новые оценки интенсивности обновления вод холодного промежуточного слоя (ХПС) за 100-летний период;

– Новая оценка водо- и солеобмена между центральной частью и периферией моря;

– Новая оценка соотношения вихревой и общей кинетической энергии геострофических течений;

– Новое обобщение многолетней изменчивости тепло- и солезапаса бассейна в виде последовательности крупномасштабных состояний – гидрологических фаз;

– Новые оценки связей изменчивости термохалинной структуры с внешними атмосферными факторами;

– Впервые полученные интегральные оценки тепло- и солезапаса по всему объему моря за 100-летний период;

– Впервые полученные оценки сезонного хода процессов субдукции / вовлечения в холодном промежуточном слое моря;

– Впервые полученные оценки осолонения / опреснения моря за 100-летний период.

– Впервые проведенная типизация сезонного хода циркуляции для всех квазистационарных антициклонов Черного моря;

– Впервые полученные закономерности многолетних изменений амплитудно-фазовых характеристик сезонного хода температуры и солености;

– Впервые полученные оценки интенсивности геострофической циркуляции для периода до 1950-х гг.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов обеспечивается использованием большого объема первичного экспериментального материала, сопоставлением различных источников информации, применением, наряду с новыми подходами, традиционных методов океанографического и гидрометеорологического

ского анализа, использованием для оценок достоверности результатов методов проверки статистических гипотез.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации представлялись на семинарах и заседаниях Ученых советов МГИ РАН и СО ГОИН, на более 30 международных, российских и украинских научных конференциях: «Морские технологии и приборостроение» (Севастополь, 1993 г.), «Фундаментальные и прикладные проблемы мониторинга и прогноза стихийных бедствий» (Севастополь, 2000), «Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей» (Донузлав, 2005 г.), «Интегрированная система мониторинга Черного и Азовского морей» (Севастополь, 2013), «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология» (Севастополь, 2016), «Системы контроля окружающей среды» (Севастополь, 2002, 2006, 2007, 2011, 2012 гг.), «Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова» (Севастополь, 2015), «Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to Anthropogenic and Climatic Changes» (Варна, 1995), «Information Technology in Oceanography (ИТО-98)» (Гоа, 1998), IOC workshop «Ocean circulation science derived from the Atlantic, Indian and Arctic sea level networks» (Тулуза, 1999), International Union of geodesy and geophysics IUGG-99 (Бирмингем, 1999), European Geophysical Society (Вена, 1997; Ницца, 2000), «An Ocean Odyssey» – Joint Assemblies IAPSO-IABO (Мар-де-Плата, 2001), «Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea, Similarities and differences of two interconnected basins» (Афины, 1999; Анкара, 2002), «Scientific and policy challenges towards an effective management of the marine environment, Emphasis on the Black Sea and the Mediterranean regions» (Варна, 2003), «Oceans Conference Record (IEEE)» (San Diego, 2003); International Marine Data and Information Conference – IMDIS (Брест, 2005; Афины, 2008; Париж, 2010; Лукка, 2013), «Black Sea ecosystem 2005 and beyond» (Стамбул, 2006), «Climate Change in the Black Sea, Hypothesis, Observations, Trends, Scenarios and Mitigation Strategy For Ecosystem» (София, 2008), 14th Biennial Challenger Conference for Marine Science (Саутгемптон, 2010), «Marine research Horizon 2020 – MARES 2020» (Варна, 2013), PERSEUS Scientific Workshop (Афины, 2014).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 96 научных работ, общим объемом более 900 с., из них 20 статей в рецензируемых журналах, 1 монография в соавторстве, 12 глав в 9 коллективных монографиях (5 изданы за рубежом), 25 статей в рецензируемых сборниках научных трудов, 34 тезиса докладов на научных конференциях, 4 атласа.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 40 работ в рецензируемых российских, украинских и международных научных изданиях. В их числе 6 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий ВАК при Минобрнауки России, 40 работ в изданиях, соответствующих п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъек-

тов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя», 9 работ в изданиях, входящих в наукометрическую базу SCOPUS.

Личный вклад автора. Диссертантом проводилась постановка целей и задач работы, выбор методов исследования, разработка программного обеспечения, выполнение всех расчетов и анализ полученных результатов. Автор неоднократно принимал участие в экспедиционных работах на научно-исследовательских судах, материалы которых использовались в диссертации.

По теме диссертации выполнено 14 работ без соавторов. В работах, опубликованных с соавторами, конкретный вклад диссертанта состоял в анализе термохалинной структуры вод, полей ветра, теплового и водного баланса бассейна, а также в подготовке климатических массивов и в применении авторского программного обеспечения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 470 наименований. Общий объем работы составляет 377 страниц, включая 205 рисунков и 16 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность безвременно ушедшим из жизни акад. НАНУ Н.П. Булгакову, д.г.н. В.С. Тужилкину, д.ф.-м.н. А.М. Суворову, к.г.н. Г.Ф. Джиганшину, д.ф.-м.н. С.Ф. Доценко, к.ф.-м.н. В.И. Бабию за постоянное внимание и поддержку. Автор благодарен уважаемым коллегам акад. РАН В.А. Иванову, чл.-корр. РАН С.К. Коновалову, чл.-корр. РАН Г.К. Коротяеву, чл.-корр. РАН А.Б. Полонскому, д.ф.-м.н. В.В. Кнышу, д.ф.-м.н. А.С. Самодурову, д.ф.-м.н. В.В. Ефимову, д.г.н. Ю.В. Артамонову, д.г.н. П.Д. Ломакину, д.ф.-м.н. А.Е. Букатову, д.г.н. Ю.Н. Горячкину, д.ф.-м.н. С.Г. Демьшеву, д.ф.-м.н. Н.Б. Шапиро, к.ф.-м.н. А.А. Сизову, к.г.н. И.Г. Шокуровой, к.г.н. А.Х. Халиулину, к.ф.-м.н. С.В. Станичному, к.ф.-м.н. А.А. Кубрякову, к.х.н. С.И. Кондратьеву, к.г.н. В.С. Архипкину, Л.Н. Репетину, д.г.н. Ю.П. Ильину, к.г.н. В.Г. Симову, д.б.н. Ю.Н. Токареву, к.б.н. В.В. Мельникову, к.г.н. Л.И. Иванову, к.г.н. И.Ф. Гертману, Э.В. Станеву, Е. Özsoy за совместный плодотворный труд и содержательные научные дискуссии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** (24 с.) представлена общая характеристика работы, включающая актуальность и степень разработанности темы, цель и задачи исследования, научную новизну работы, ее практическую значимость, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

В **первом разделе** (21 с.) описаны основные исторические этапы исследований Черного моря от периода античности до настоящего времени в хронологической последовательности.

Общие черты гидрологической структуры Черного моря известны с первой половины XX вв. по работам Ф.Ф. Врангеля, И.Б. Шпиндлера, Н.М. Книповича, далее они постоянно уточнялись многочисленными исследованиями, в том числе в обобщающих работ А.К. Леонова, Д.М. Филиппова, А.С. Блатова, В.С. Тужилкина, И.Ф. Гертмана, В.Н. Белокопытова.

Общепринятая номенклатура водных масс Черного моря была предложена А.К. Леоновым, объемный T,S-анализ был выполнен В.В. Глазковым, И.Ф. Гертманом, О.И. Мамаевым, В.С. Архипкиным и В.С. Тужилкиным, В.Н. Белокопытовым.

Эволюция взглядов на механизмы образования ХПС развивались от «конвекционной» гипотезы И.Б. Шпиндлера и Н.Н. Зубова к «адвективной» гипотезе А.Г. Колесникова и, далее, к идее о преобладающей роли центральной части моря (Ю.С. Георгиев, И.М. Овчинников, Ю.И. Попов).

В 1990-х гг. были значительно уточнены термохалинные характеристики глубинных и придонных вод Черного моря, в частности, квази-изотермического слоя на глубинах 500–700 м, придонного пограничного слоя, толщиной 300–400 м, тонкой структуры в глубинных слоях. Экспериментальный материал, полученный в проливе Босфор и прибосфорском районе, позволил лучше представить процесс поступления мраморноморских вод и формирования глубинных вод бассейна.

Характеристики сезонного цикла температуры и солености в Черном море наиболее полно представлены в работах Д.М. Филиппова, В.С. Тужилкина, И.Ф. Гертмана, В.Н. Белокопытова. Процессы сезонного перераспределения содержания солей в верхнем слое Черного моря были рассмотрены С.Н. Булгаковым, Г.К. Коротаяевым.

В период с 1956 г. по 2011 г. было опубликовано не менее 8 атласов Черного моря, в том числе один зарубежный, которые включали разделы гидрофизических полей. Эти издания охватывают разные периоды проведения наблюдений, имеют различное количество представляемых параметров, различную степень пространственной и временной детализации сезонного цикла и выполнены с помощью различных методов.

Межгодовая и многолетняя изменчивость температуры воды наиболее изучена в поверхностном слое Черного моря: по данным береговых метеорологических станций (Ю.П. Ильин, Л.Н. Репетин, В.Н. Белокопытов) и спутниковых радиометров (А.И. Гинзбург, А.Н. Жуков, А.Е. Букатов, М.В. Бабий, Ю.В. Артамонов, А.В. Кара, G.I. Shapiro), а также в холодном промежуточном слое (ХПС) (В.С. Тужилкин, В.Г. Кривошея, Ю.И. Попов, О.И. Прокопов, В.Б. Титов, Л.И. Иванов, В.Н. Белокопытов). Меньшее количество исследований посвящено слою постоянного пикноклина (В.С. Тужилкин, И.Ф. Гертман, А.Б. Полонский, Е.А. Ловенкова, И.Г. Шокурова, В.Н. Белокопытов, M.N. Tsimplis) и глубинным слоям моря (А.Б. Полонский, Е.А. Ловенкова, И.Г. Шокурова, В.Н. Белокопытов).

Многолетние тенденции изменений солености в поверхностных водах, в слое постоянного галоклина и в глубинных слоях исследовались в работах Э.Н. Альтмана, А.С. Блатова, А.Н. Косарева, В.С. Тужилкина, Р.Р. Белевича, А.Б. Полонского, Е.А. Ловенковой, И.Г. Шокуровой, В.Н. Белокопытова, M.N. Tsimplis. Изменчивость

океанографических характеристик, непосредственно связанных с галоклином — доступной потенциальной энергии, вертикальной устойчивости, положения постоянного пикноклина — рассматривалась в работах А.М. Суворова, А.Х. Халиулина, И.Г. Шокуровой, А.Б. Полонского, Е.А. Ловенковой, В.Н. Белокопытова.

Основные представления об общей схеме течений в Черном море как циклоническом движении с двумя крупными круговоротами сложились в конце XIX – начале XX вв. в работах Ф.Ф. Врангеля, И.Б. Шпиндлера, Н.И. Андрусова, С.А. Зернова, Н.М. Книповича. Традиционно схемы течений Черного моря составлялись с помощью динамического метода по полям плотности воды с привлечением инструментальных измерений: G. Neumann, А.К. Леонов, Д.М. Филиппов, О.Н. Богатко, В.С. Тужилкин, И.Ф. Гертман, В.Н. Белокопытов, И.Г. Шокурова. В дальнейшем использовались гидродинамические модели: С.Г. Демьшев, Г.К. Коротаев, В.В. Кныш, Р.А. Ибраев, Т. Oguz, J.V. Staneva, E.V. Stanev, D.I. Trukhchev, альтиметрические измерения и дрейферные технологии: Г.К. Коротаев, В.М. Журбас, С.В. Станичный, А.А. Кубряков, Р.-М. Poulain.

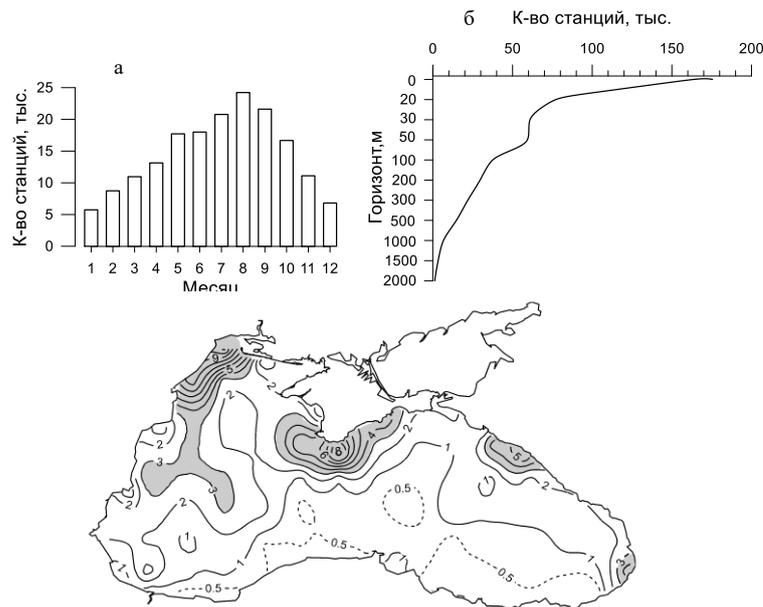
Обширная литература посвящена различным вопросам, касающимся физических механизмов возникновения, географического положения и эволюции синоптических вихрей в Черном море: А.И. Гинзбург, А.Г. Зацепин, В.Г. Кривошея, Ю.Н. Голубев, В.М. Журбас, А.С. Блатов, В.С. Латун, В.Б. Титов, Г.К. Коротаев, С.В. Станичный, А.А. Кубряков, Т. Oguz, Р.-М. Poulain.

Межгодовая и междесятилетняя изменчивость интенсивности общей циркуляции Черного моря оценивалась с помощью динамического метода (А.Б. Полонский, И.Г. Шокурова, Е.А. Ловенкова) и альтиметрических данных (С.В. Станичный, А.А. Кубряков). В МГИ РАН было создано несколько цифровых массивов реанализа термохалинных полей и циркуляции вод Черного моря для периода 1971–2012 г. и проведен анализ полученных результатов (В.В. Кныш, В.Л. Дорофеев).

Во втором разделе (45 с.) дана характеристика использованных материалов и описаны применяемые методы исследования.

В подразделе 2.1 представлена информационная основа работы: массив океанографических данных (177 тыс. станций, 1910–2015 гг.), включающий буи ARGO и термопрофилирующие буи (2002–2015 гг.), данные наблюдений на 32 станциях морской гидрометеорологической сети, спутниковые данные о температуре поверхности (1985–2015 гг.) и уровне моря (1992–2015 гг.), массивы реанализа атмосферных полей ERA-40, NCEP/NCAR, MERRA, GPCC и BAO МГИ, массивы реанализа гидрофизических полей Черного моря МГИ (1971–1993 гг., 1992–2002 гг.).

Несмотря на значительный объем массива океанографических данных Черного моря, распределение гидрологических станций крайне неравномерно во времени и пространстве (рис. 1). К концу 1990-х гг. объем информации значительно сократился, дойдя до уровня 1920-х гг., синоптические съемки всего моря не проводились. В последнее десятилетие основная часть океанографических данных поступает от автономных дрейфующих буев. Неоднородность исходной информации снижает достоверность оценок климатических изменений и ведет к необходимости применения методов фильтрации и регуляризации данных наблюдений.



Значения в тысячах станций

Рис. 1. Общее количество гидрологических станций, выполненных в Черном море за период 1922–2015 гг.: а) по месяцам года; б) по горизонтам наблюдений; в) в пространстве («квадраты» 40'×60')

В подразделе 2.2 рассматривается методика реанализа термохалинных полей Черного моря. В качестве математической основы использовались методы, основанные на учете статистической структуре данных, в частности оптимальная интерполяция и разложение на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). К недостаткам статистических методов следует отнести сильную зависимость от количества и распределения данных, а также достаточно формальный подход, явным образом не учитывающий физику процессов. В то же время, это является определенным преимуществом в сравнении с реанализом, основанном на гидродинамических моделях, так как избавляет от необходимости учета внешних атмосферных воздействий. Несмотря на появление массивов глобального реанализа атмосферных полей, охватывающих весь XX в. (NOAA 20CR и ERA-20C), их качество для первой половины прошлого века во многом будет нивелировать все преимущества гидродинамических моделей для реконструкции термохалинной структуры на вековом интервале.

На рис. 2 показана общая схема выполнения реанализа термохалинных полей. Первичные данные проходят проверку качества, интерполируются методом оптимальной интерполяции (ОИ) на регулярную сетку по декадам, затем осредняются по месяцам, после чего вычисляются эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) и временные коэффициенты ЭОФ. Далее термохалинные поля восстанавливаются по коэффициентам ЭОФ во всем объеме моря для тех конкретных лет, где пространственная структура данных позволяет это сделать.

Метод оптимальной интерполяции для предварительной регуляризации первичных данных реализовывался согласно работе [Гандин, 1963]. Было принято допущение об изотропности пространственных корреляционных функций термохалинных полей Черного моря. Для автокорреляционной функции использовалось приближение в виде $\mu(r) = \exp(-ar^2)$, аппроксимирующем корреляционную структуру гауссовых полей [Григорьев и др., 1996].

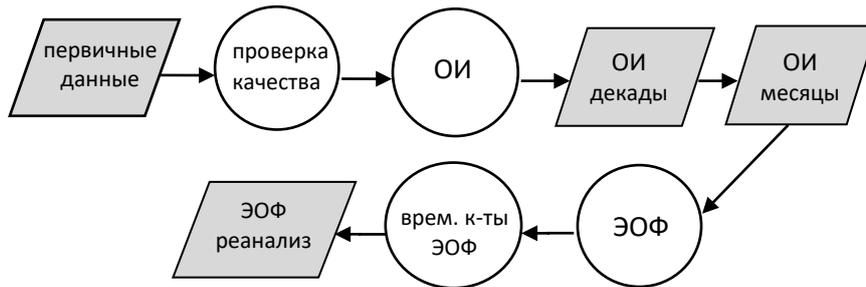


Рис. 2. Общая схема реанализа термохалинных полей

В работе применялось два метода реконструкции полей: по горизонтальным ЭОФ и вертикальным ЭОФ. Метод горизонтальных ЭОФ следует общему алгоритму подобных методов восстановления полей Мирового океана [Kaplan, 1998; Vecsers, 2003; Rayner, 2003].

После выполнения этапа оптимальной интерполяции образуется набор векторов (полей) для различных моментов времени в виде аномалий от климатических среднемесячных полей $\mathbf{x}'_t = \mathbf{x}_t - \bar{\mathbf{x}}$ с пропусками во времени и пространстве. Далее рассчитывалась общая автоковариационная матрица

$$C = \text{Cov}(\mathbf{x}', \mathbf{x}') \quad (1)$$

по всему набору векторов \mathbf{x}'_t . Матрицы C , рассчитанные для каждого горизонта, сглаживались 3-точечным фильтром Шапиро 5-ю итерациями отдельно для рядов и столбцов матрицы. После этого для C решалась задача поиска собственных чисел и векторов (спектральное разложение матрицы)

$$C = E \Lambda E^T, \quad (2)$$

где E — матрица собственных векторов;

Λ — диагональная матрица собственных чисел;

E^T — транспонированная E .

Поиск собственных векторов E осуществлялся с применением алгоритмов QL/QR-итерации, которые более эффективны, чем традиционные способы, такие как метод Якоби.

Затем для каждого вектора (поля) \mathbf{x}'_t рассчитывались временные коэффициенты для каждой моды ЭОФ

$$\alpha_{ti} = \mathbf{x}'_t \mathbf{e}^i, \quad (3)$$

которые, учитывая пропуски в полях \mathbf{x}'_t , определялись по аналогии с методом наименьших квадратов

$$\hat{\alpha}_i = \frac{\sum_{j \in K} x'_j e_j^i}{\sum_{j \in K} |e_j^i|^2} \quad (4)$$

где $K = \{j: x'_j \text{ не пропущенные значения}\}$;
 $\hat{}$ — символ статистической оценки.

На последнем этапе, путем обратной процедуры результирующее поле восстанавливалось во всех узлах сетки

$$\mathbf{x}'_t \approx \sum_{i=1}^M \hat{\alpha}_{ti} \mathbf{e}^i, \quad (5)$$

где M — количество старших мод, участвующих в реконструкции;
 $\hat{}$ — символ статистической оценки.

При анализе результатов реконструкции выяснилось, что данный подход, использовавшийся ранее только для полей на поверхности моря, плохо подходит для восстановления связной трехмерной структуры. Поэтому, горизонтальные ЭОФ в дальнейшем использовались для анализа многолетней изменчивости на отдельных горизонтах, а для расчетов согласованной по вертикали термохалинной структуры был разработан новый метод, основанный на сочетании вертикальных и горизонтальных ЭОФ.

Общая схема расчета по новому методу в целом аналогична приведенной выше схеме для горизонтальных ЭОФ, но имеются ряд существенных дополнений. Сначала по массиву ОИ рассчитываются Ψ — вертикальные ЭОФ (функции от z). Исходные векторы \mathbf{x}'_t в этом случае представляют собой аномалии от среднемесячного климатического вертикального профиля в узле сетки. При этом, ЭОФ для температуры воды рассчитывались отдельно для теплого и холодного полугодий, а для солености — для всего года, т.к. сезонных различий выявлено не было. Затем рассчитываются ряды временных коэффициентов вертикальных ЭОФ в каждом узле сетки для каждой вертикальной моды $\beta_{ti} = \mathbf{x}'_t \boldsymbol{\psi}^i$. Далее, в качестве исходных горизонтальных полей принимаются β_{ti} и для них находится \mathbf{E} — матрица горизонтальных ЭОФ временных коэффициентов вертикальных мод ЭОФ.

На последнем этапе, для каждого поля β_{ti} рассчитываются временные коэффициенты для каждой горизонтальной моды ЭОФ

$$\alpha_{ti} = \beta_{ti} \mathbf{e}^i \quad (6)$$

и, путем двух обратных процедур, восстанавливаются вертикальные профили в каждом узле расчетной области

$$\hat{\beta}_{ti} \approx \sum_{i=1}^M \hat{\alpha}_{ti} e^i, \quad (7)$$

$$\hat{x}'_t \approx \sum_{i=1}^L \hat{\beta}_{ti} \psi^i, \quad (8)$$

где M — количество горизонтальных мод;

L — количество вертикальных мод, участвующих в восстановлении полей;

$\hat{}$ — символ статистической оценки.

Спектры собственных чисел ЭОФ в этом методе демонстрируют гораздо большую концентрацию дисперсии колебаний в области старших мод, чем в случае только горизонтальных ЭОФ. После серии вычислительных экспериментов для выбора оптимальных параметров было решено ограничиться 5-ю вертикальными модами ЭОФ и 5-ю горизонтальными модами временных коэффициентов вертикальных мод ЭОФ. Такое сочетание обеспечило минимальное отклонение от исходного массива данных при значительном снижении количества искусственных вертикальных инверсий и существенной экономии времени вычислений.

В результате расчетов были получены новые цифровые массивы термохалинной структуры Черного моря с пространственным разрешением $10' \times 15'$ по горизонтали (1120 узлов регулярной сетки 18,5 км по широте и 19–21 км по долготе) и 67 горизонтов по вертикали (в слое 0–100 м через 5 м, далее с шагом от 10 до 200 м):

- массивы интерполированных значений (ОИ) с долей покрытия от 10 до 80 % площади моря для периода наблюдений 1910–2015 гг. с временной дискретностью 10 суток и 1 месяц;

- массив среднемесячных восстановленных полей с полным покрытием объема моря (реанализ) за период 1923–2015 гг.;

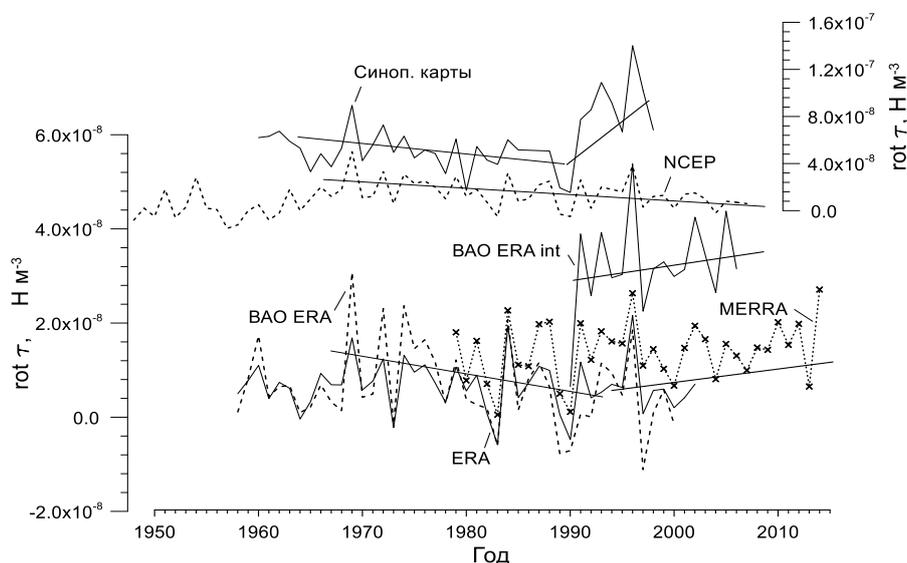
- массивы средних полей за отдельные климатические периоды и за весь период наблюдений.

В **третьем разделе** (68 с.) анализируются внешние гидрометеорологические факторы, обуславливающие сезонную и многолетнюю изменчивость термохалинной структуры вод, по различным источникам информации.

В **подразделе 3.1** представлены оценки пространственно-временной изменчивости полей ветра в Азово-Черноморском бассейне. Интенсивность межгодовых колебаний характеристик ветра уступает интенсивности сезонной изменчивости: для скорости ветра – до 60 % СКО сезонного хода по данным береговых станций, до 20 % СКО по данным массивов реанализа; для $\text{rot } \tau$ — до 40 % СКО сезонного хода. Межгодовая изменчивость скорости ветра, как и сезонного цикла, максимальна в открытых районах западной и северо-восточной частей моря.

В многолетнем ходе значений скорости ветра явным образом выделяется тенденция к снижению ветровой активности во второй половине XX века, после 2000 г.

в определенных районах моря началось усиление ветра. Аналогичные тенденции прослеживаются и в многолетних колебаниях завихренности касательного напряжения ветра — во второй половине XX века она уменьшалась, после 1990-х гг. по большинству источников завихренность стала увеличиваться (рис. 3).



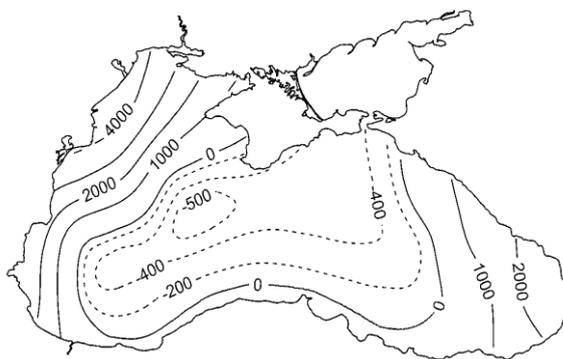
Значения для NCEP и синоптических карт относятся к правой оси

Рис. 3. Среднегодовые значения завихренности касательного напряжения ветра над Черным морем по данным различных источников

Сезонный ход завихренности ветра над морем качественно соответствует сезонному циклу скорости ветра: завихренность минимальна в конце весны–начале лета и максимальна зимой. Сезонный ход основных факторов формирования преобладающей циклонической завихренности ветра над Черным морем и ее сезонного хода — муссонного эффекта и непосредственного воздействия барических образований — качественно совпадают. Сильную циклоническую завихренность над морем почти в равной степени могут вызывать непосредственно циклоны (54 %) и, косвенно антициклоны (46 %), которые обостряют барические ложбины. Наибольшее влияние оказывают средиземноморские (южные) циклоны и гребни Сибирского (Азиатского) антициклона.

Приземное атмосферное давление, количество циклонов и антициклонов над Черным морем наиболее тесно связаны с Североатлантическим колебанием (NAO), наибольшее влияние на завихренность ветра оказывает Восточноатлантическое колебание (EA). Уменьшение общего количества циклонов в период 1960–2000-х гг., в частности средиземноморских циклонов, способствовало уменьшению циклонической завихренности поля ветра.

Подраздел 3.2 посвящен водному балансу бассейна. При общем положительном пресном балансе Черного моря, его составляющие крайне неравномерно распределены по акватории, в особенности атмосферные осадки и речной сток. Область результирующего отрицательного баланса пресных вод занимает центральную часть моря, а зоны избытка пресной составляющей охватывают юго-восточную и северо-западную части моря (рис. 4).



Значения в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}/\text{год} \approx \text{мм}/\text{год}$, штриховыми линиями отображены отрицательные значения

Рис. 4. Результирующий баланс пресных вод Черного моря с учетом пространственного распределения речного стока

Межгодовая изменчивость баланса пресных вод Черного моря (рис. 5) и его составляющих очень высока, ее интенсивность сопоставима с сезонной изменчивостью или превышает ее, в особенности для речного стока и атмосферных осадков. Относительный вклад многолетних колебаний составляющих пресного баланса не соответствует их соотношению в сезонном цикле. Для межгодовой изменчивости наиболее велика интенсивность колебаний речного стока и осадков, в сезонном цикле преобладает роль испарения.

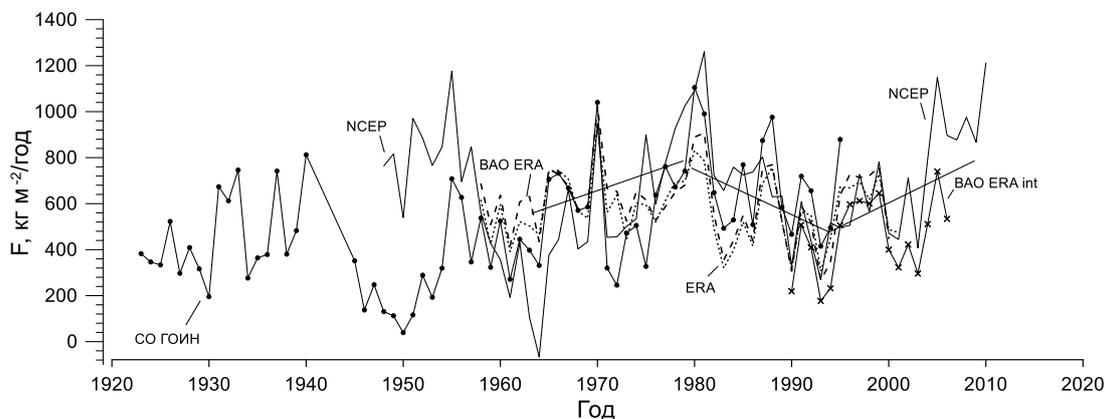


Рис. 5. Среднегодовые значения составляющих баланса пресных вод Черного моря по данным СО ГОИН, NCEP, ERA-40 и ВАО МГИ

Наибольшее влияние на изменчивость речного стока и суммарного пресного баланса оказывает NAO, от которого зависит смещение траекторий циклонов и колебание Восточная Атлантика/Запад России (EA/WR), в отрицательную фазу которого возрастает количество циклонов над водосбором Дуная. С количеством атмосферных осадков над морем заметным образом связан лишь индекс EA, в отрицательную фазу которого на Черное море приходит больше интенсивных циклонов, как южных, так и атлантических. На испарение более всего влияет восточная форма циркуляции E, с которой связан перенос на Черное море воздушных масс с юга.

В подразделе 3.3 рассматривается внешний тепловой баланс моря. К региональным особенностям теплового баланса Черного моря относятся: низкие, в сравнении с районами Мирового океана на тех же широтах, значения потерь тепла на испарение; разделение бассейна на зону поступления тепла в южной части моря и зону отдачи тепла в северной части (в среднем за год); максимум суммарного турбулентного теплообмена в западной половине моря.

Пространственная картина интенсивности сезонного хода внешнего теплового баланса в основном определяется влиянием потерь тепла на испарение и, в меньшей степени, радиационным балансом. Как следствие, амплитуда сезонного цикла результирующего теплового баланса максимальна в открытых районах западной части моря (рис. 6а).

В отличие от пресного баланса моря, интенсивность межгодовой изменчивости внешнего теплового баланса значительно уступает интенсивности сезонного хода. Соотношение межгодовых колебаний отдельных составляющих теплового баланса не соответствует их относительной роли в сезонном ходе. Если в сезонном цикле основную роль играет солнечная радиация, то в межгодовой изменчивости она сопоставима с турбулентным теплообменом. В осенне-зимний период интенсивность межгодовой изменчивости турбулентного обмена возрастает в 2 раза за счет роста амплитуды колебаний потока явного тепла.

Пространственная картина интенсивности межгодовой изменчивости внешнего теплового баланса отличается от сезонного распределения тем, что в гораздо большей степени зависит от изменчивости суммарного турбулентного обмена, которая максимальна в северной половине моря (рис. 6б).

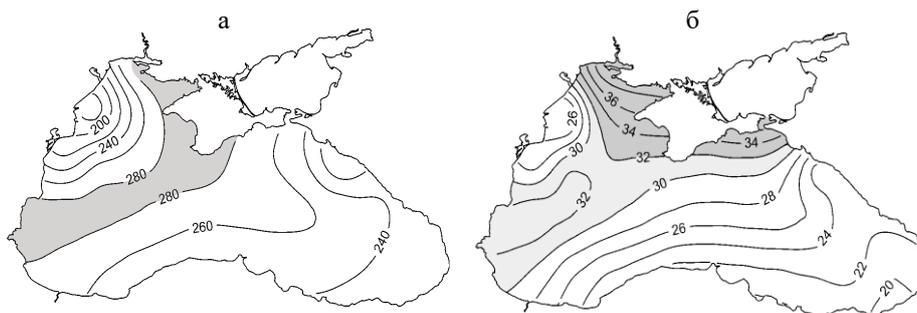


Рис. 6. Пространственное распределение размаха (а) сезонного хода и (б) СКО межгодовой изменчивости внешнего теплового баланса поверхности Черного моря ($\text{Вт}/\text{м}^2$) по данным ERA-40

В целом, результирующий внешний тепловой баланс (B) возрастал в 1960х – первой половине 1970х гг. от значений близких к нулю ($-10 \div 10 \text{ Вт}/\text{м}^2$) до преобладания положительных значений ($0 \div 20 \text{ Вт}/\text{м}^2$) в 1980–1990 гг., и затем, к началу XXI в. вновь снизился (рис. 7). Эти тенденции обусловлены, в основном, многолетним ходом турбулентного обмена моря с атмосферой, в первую очередь за счет потерь тепла на испарение. Несмотря на небольшие значения среднегодовых аномалий

B (~ в 5 раз меньше амплитуды сезонного хода), эти величины одного порядка с соответствующими среднегодовыми изменениями теплозапаса моря и могут считаться основной причиной многолетних изменений термической структуры вод.

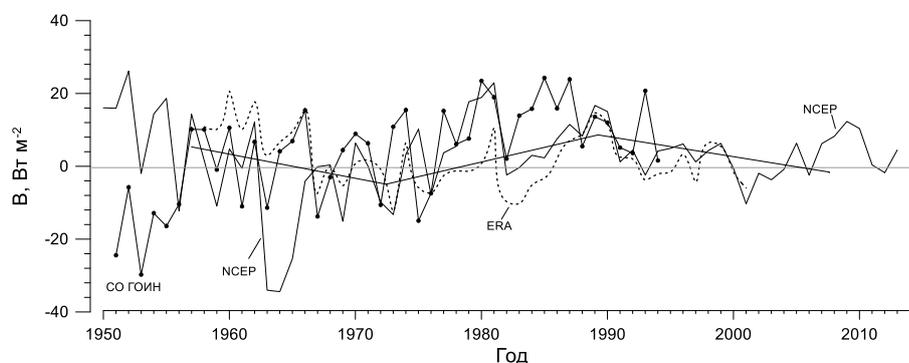


Рис.7. Среднегодовые значения внешнего теплового баланса на поверхности Черного моря по данным СО ГОИН, NCEP, ERA-40

В подразделе 3.4 исследовалась взаимосвязь многолетней изменчивости теплового и водного баланса. Для теплового баланса возникновение преобладающих отрицательных обратных связей температуры поверхности моря и внешнего теплового баланса происходит за счет уходящего длинноволнового излучения, потоков явного и скрытого тепла. Для водного баланса периоды потепления сопровождаются увеличением притока пресных вод из-за увеличения осадков и речного стока, а периоды похолодания — его уменьшением за счет речного стока и испарения. В целом, тепловой и водный баланс реагируют на изменения температуры подстилающей поверхности противоположным образом.

В четвертом разделе (80 с.) на основе новых климатических массивов рассматривается сезонный цикл гидрологической структуры вод Черного моря.

В подразделе 4.1 представлены основные характеристики сезонных изменений термической структуры вод. Внутригодовая изменчивость температуры воды в Черном море очень велика, особенно в северо-западной части моря, где размах сезонных колебаний на поверхности достигает 20°C . Сезонные колебания такой величины присущи лишь определенной части морей умеренных широт, таких как Северное, Балтийское, дальневосточные моря. В области, прилегающей к юго-западному Крыму годовой ход минимален, размах сезонного хода на поверхности не превышает 16°C .

Сезонные колебания температуры быстро затухают с глубиной (рис. 8). На глубине 75 м, близкой к глубине максимума вертикального градиента плотности, размах сезонных изменений температуры в сравнении с поверхностью уменьшается в 30 раз, в западном циклоническом круговороте — в 85 раз. Для слоя 0–50 м характерен фазовый сдвиг температуры воды, обусловленный слабым теплообменом в сезонном термоклине, в слое 100–200 м основную роль играет сезонный ход циркуляции вод, глубже 200 м — полугодовые колебания малой амплитуды.

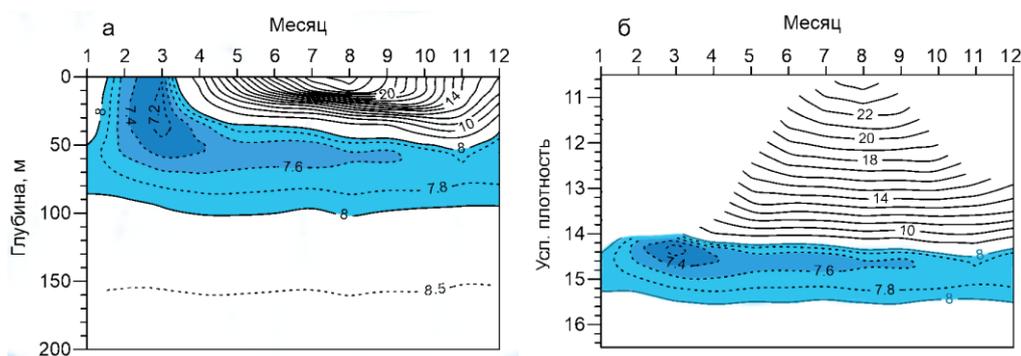


Рис. 8. Сезонный ход среднего по акватории моря распределения температуры воды: а) по глубине; б) по изопикнам

Суммарный вклад первых двух гармоник в дисперсию сезонных колебаний температуры воды в Черном море снижается от почти 100 % на поверхности моря до 60 % на горизонтах 150–300 м. Влияние полугодовой гармоники максимально в слое 50–80 м, где ее вклад в общую дисперсию составляет более 20 %. Сезонный цикл вертикальных профилей температуры воды практически полностью описывается тремя первыми вертикальными модами ЭОФ (97,5%), подавляющую часть изменчивости (84%) содержит 1-я мода.

Пространственная картина сезонного цикла перераспределения тепла по акватории моря последовательно изменяется от поверхностного слоя к слою основного пикноклина. В поверхностном слое 0–10 м в период охлаждения с октября по март формируется язык теплых вод, разделяющий холодные воды северо-западной и центральной частей моря, благодаря адвекции тепла с потоком Основного черноморского течения (ОЧТ) из восточной половины моря в западную. В феврале–марте холодные воды западной части моря распространяются далеко на восток, вдоль Анатолийского побережья. Для весеннего периода нагрева, с апреля по июнь, характерна квадрупольная структура — наличие двух максимумов теплозапаса: в юго-западной и юго-восточной части моря и двух минимумов: на северо-западном шельфе и в центральной части Анатолийского побережья. Анатолийский минимум, связанный с апвеллингом, очень устойчив и сохраняется до сентября.

В подповерхностном слое 30–100 м сезонный ход теплосодержания слоя полностью определяется внутригодовой эволюцией вод ХПС: распространение холодных вод в феврале–апреле из западной части моря в восточную часть вдоль турецкого побережья и накопление холодных вод в восточной части моря в мае–ноябре (рис. 9).

Пространственное распределение теплозапаса в слое 100–200 м достаточно стабильно на протяжении года, оно обусловлено циклонической циркуляцией моря, приводящей к подъему более теплых глубинных вод в центре моря и опусканию более холодных вод ХПС на периферии моря. Теплосодержание западной части моря, в целом выше, чем в восточной части, несмотря на то, что интенсивность циркуляции и, соответственно, адвекция тепла из глубины выше в восточном циклониче-

ском круговороте. Это связано с тем, что наиболее холодные воды ХПС большую часть времени годового цикла концентрируются в восточной части моря.

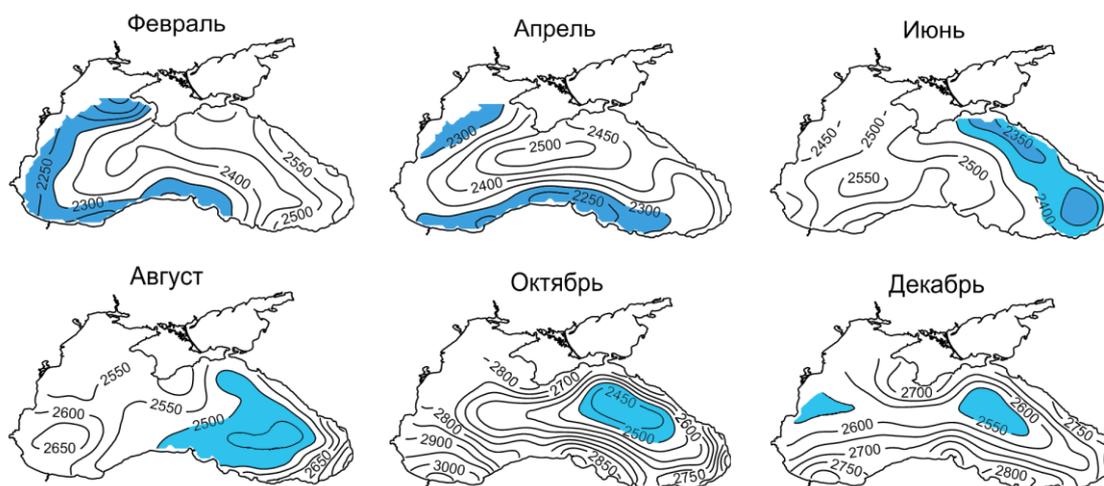


Рис. 9. Сезонный ход теплозапаса в слое 30–100 м (МДж/м²)

Условия образования ХПС в Черном море аналогичны таковым в морских и океанических бассейнах умеренных и полярных широт, где конвекция ограничена по глубине галоклином как, например, в Балтийском, Охотском морях, субарктических районах. В тех районах Черного моря, где конвективные процессы зимой слабо развиты, ХПС имеет адвективное происхождение. В настоящее время накоплено достаточно натуральных данных, свидетельствующих о том, что ХПС образуется как в центрах циклонических круговоротов [Овчинников, Попов, 1987], так и на континентальном склоне северо-западной части моря (рис. 10).

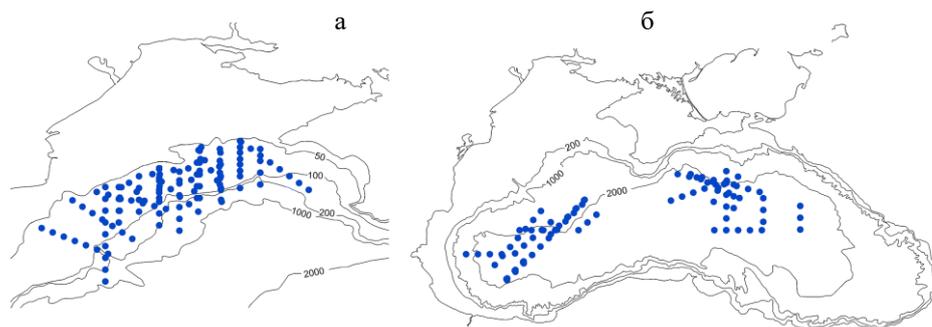


Рис. 10. Положение океанографических станций, на которых наблюдалось (а) стекание придонных холодных вод по континентальному склону и внешнему краю северо-западного шельфа (1973–2004 гг.); (б) обновление ХПС в центрах циклонических круговоротов (1957–1993 гг.)

В течение сезонного цикла объем вод ХПС в среднем уменьшается в 2–3 раза, температура, соленость и плотность в ядре слоя возрастают на 0,8° С, 0,5 ‰ и 0,4 кг/м³, соответственно. Воды ХПС после зимнего обновления смещаются из западной половины бассейна в восточную, стекание холодных вод придонного слоя северо-западного шельфа в сторону открытого моря продолжается вплоть до осени.

Наряду с процессами конвекции, турбулентной диффузии и адвекции в сезонной эволюции характеристик ХПС определенную роль играет изопикническая субдукция. Экмановская «подкачка» (20 м/месяц) препятствует субдукции вод ХПС, β -эффект (10 м/год) при движении вод на север способствует субдукции, при движении на юг приводит к дополнительному вовлечению вод из пикноклина. Общая тенденция сезонного цикла процессов субдукции/вовлечения заключается в преобладании вовлечения во время зимне-весеннего периода и преобладание субдукции в остальное время года.

Подраздел 4.2 посвящен халинной структуре вод и ее сезонной изменчивости. Внутригодовые колебания солености на поверхности в Черном море по своим характеристикам типичны для бассейна Атлантического океана. В устьях больших рек, в северо-западной части моря размах сезонных колебаний солености достигает 4 ‰, в центральной части моря не превышает 0,4 ‰.

Минимум солезапаса поверхностных слоев моря наблюдается в июле, через два месяца после максимального значения пресного баланса. В летний период процесс перераспределения речных вод, поступивших в море за период весеннего паводка, сопровождается уменьшением интенсивности общей циркуляции и ветрового перемешивания, что способствует развитию сезонного галоклина. Максимум солезапаса в слое 0–100 м приходится на зимний период, когда происходит активное ветровое и конвективное перемешивание в поверхностном слое, а усиление общей циркуляции моря обеспечивает подъем глубинных вод повышенной солености.

Сезонный цикл пространственного распределения солености качественно меняется при переходе от поверхности моря к слою постоянного галоклина. В слое 0–20 м двухъядерная структура солезапаса с максимумами в центрах крупномасштабных циклонических круговоротов характерна для зимне-весеннего периода (рис. 11). Летом, при общем распреснении моря и ослаблении циркуляции моря, локальные максимумы становятся слабо выраженными, вся центральная часть моря представляет собой более однородную область. В осенний период максимум солезапаса смещается в область восточного циклонического круговорота.

В слое 20–75 м (ХПС), двухъядерная структура солезапаса преобладает, наоборот, в летний период. В остальное время года типичным является пространственное распределение с восточным максимумом солезапаса. Для слоя постоянного пикноклина характерно летнее преобладание максимума солезапаса в западном циклоническом круговороте.

Основная часть сезонной изменчивости вертикальных профилей солености описывается тремя первыми вертикальными модами ЭОФ (84,5 %). Большую часть изменчивости (53 %) содержит 1-я мода с максимумом амплитуды в верхней части галоклина. Суммарный вклад первых двух гармоник в дисперсию сезонных колебаний солености в Черном море снижается от 85 % в поверхностном слое до 40 % на горизонте 200 м. Влияние полугодовой гармоники максимально в нижней части сезонного термоклина (слой 25–35 м), где ее вклад в общую дисперсию составляет 20 %.

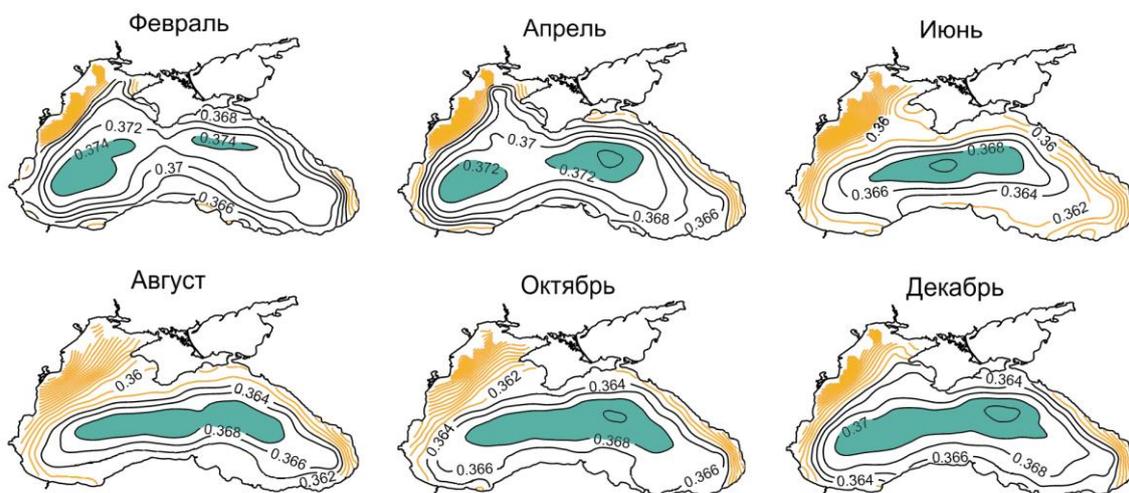


Рис. 11. Сезонный ход солезапаса в слое 0–20 м (т/м^2)

Пространственная структура сезонных ЭОФ-функций солёности, в отличие от температуры воды, отражает противофазные колебания солезапаса между различными частями моря, наиболее выраженные в верхней части постоянного галоклина. 1-я пространственная мода (46 %) характеризует различия между центральной частью моря и периферией, связанные с сезонным ходом интенсивности циркуляции вод, когда солезапас центральной части моря увеличивается зимой из-за усиления восходящих движений, а на периферии моря уменьшается. В весенне-летний период происходит обратный процесс, на который накладывается проникновение речных вод в центральную часть моря.

Солевой баланс шельфовых районов существенно отличается от открытой части моря. Избыток пресных вод в шельфовой зоне (5,8 млрд т/год) полностью уравнивается водообменом с открытым морем. В центральной части моря сумма притока соли за счет подъема вод галоклина (3,6 млрд т/год) и отрицательного пресного баланса (2 млрд т/год) практически компенсируется солеобменом с периферией моря (5,8 млрд т/год), уравнивая избыток поступления пресных вод в шельфовой зоне. В целом по морю, положительный баланс пресных вод в слое 0–50 м компенсируется притоком солей из глубинных слоев (рис. 12).

В подразделе 4.3 рассматриваются T,S-характеристики вод Черного моря. Сезонный T,S-цикл в поверхностных и подповерхностных слоях представляет собой рост температуры при снижении солёности в первом полугодии и падение температуры при росте солёности во втором полугодии (рис. 13). В постоянном пикноклине направленность сезонного хода T,S-индексов изменяется на противоположную, что связано с уменьшением влияния теплового и водного баланса с глубиной и возрастанием роли общей циркуляции моря.

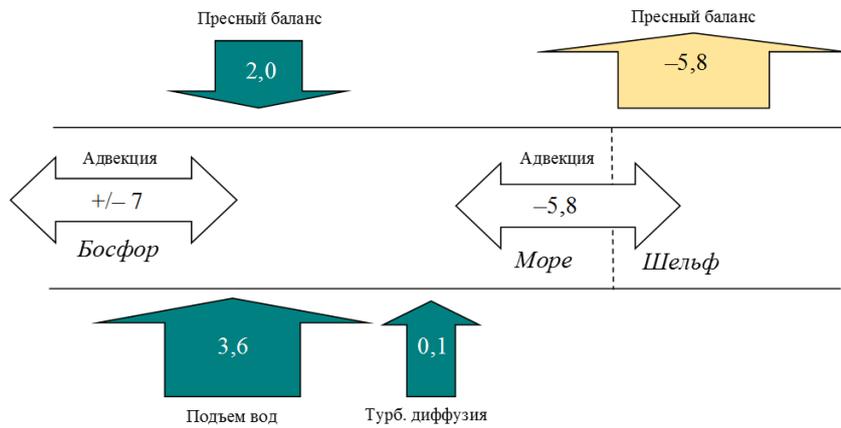


Рис. 12. Составляющие солевого баланса в слое 0–50 м Черного моря (млрд т/год)

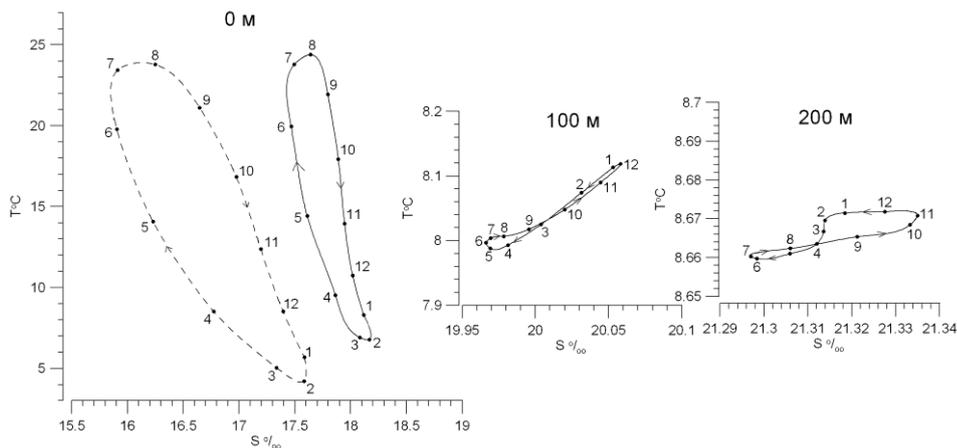


Рис. 13. Сезонный ход средних T,S-индексов, аппроксимированный суммой 1-й (годовой) и 2-й (полугодовой) гармоник

Среди водных масс Черного моря наибольшей амплитудой сезонных колебаний объема вод отличается прибрежная водная масса. Ее объем (при критерии выделения $S < 17,8 ‰$) увеличивается от зимы к лету в 3 раза, с максимумом в июле, к моменту смены направления водообмена между шельфом и центральной частью моря.

Подраздел 4.4 посвящен сезонным изменениям плотности и устойчивости вод. Большая амплитуда внутригодовой изменчивости температуры воды и хорошо выраженный сезонный цикл солености определяют характер сезонного хода плотности воды в Черном море. Средний размах сезонных колебаний на поверхности моря равен $3,3 \text{ кг/м}^3$, что превышает типичные значения для сезонного хода плотности в Мировом океане. В верхнем 100-метровом слое плотность определяется в основном температурой воды, начиная с глубины 100 м — соленостью.

Сезонный ход вертикальных градиентов плотности (рис. 14) имеет свои особенности, не являясь прямым отражением сезонного хода температуры или солёности. На поверхности моря стратификация максимальна в июне–июле в период максимального распреснения и интенсивного прогрева. С глубиной происходит запаздывание времени достижения максимума, на горизонте 75 м — к декабрю. Абсолютный максимум плотностной стратификации в сезонном термоклине наблюдается в июле–августе (среднее значение $0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-4}$). Глубина залегания сезонного слоя скачка увеличивается от 15 м в мае–июле до 30 м в октябре. Глубина слоя скачка в постоянном пикноклине в среднем равна 60–65 м ($\sigma_t = 14,8$).

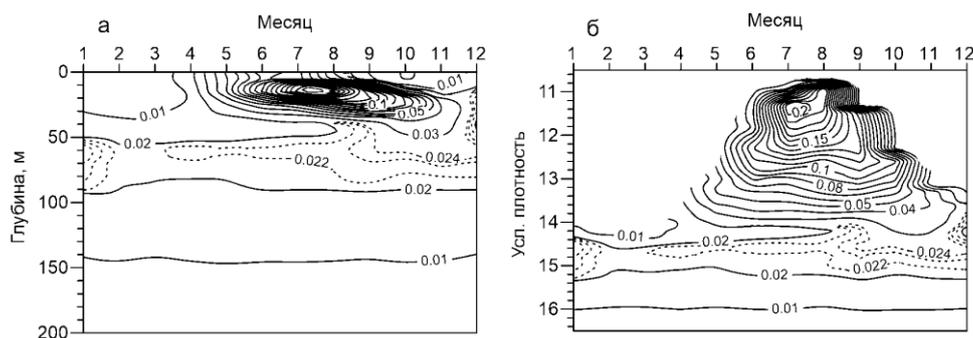


Рис. 14. Сезонный ход среднего по акватории моря распределения вертикального градиента плотности ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-4}$): а) по глубине; б) по изопикнам

Относительный вклад температурного и солёностного факторов в плотностную стратификацию с глубиной меняется: термическая устойчивость $E_t = \alpha dT/dz$ в поверхностном слое превышает солёностную устойчивость $E_s = \beta dS/dz$ в 2–3 раза, глубже ядра ХПС вклад E_t становится отрицательным. Начиная с 40 м, преобладает E_s , превышая в слое пикноклина E_t на два порядка.

Из годового хода плотностного отношения $R = E_t / E_s$ следует, что в зимний период E_t и E_s в поверхностном слое примерно равны, а летом E_t значительно преобладает (в 15 раз). Смена знака R происходит в слое 50–100 м, что связано с инверсией температуры воды ниже оси ХПС. E_t в слое постоянного термоклина незначительно увеличивается от зимы к лету (в 1,2 раза).

В подразделе 4.5 рассматривается сезонная изменчивость общей циркуляции вод Черного моря и характеристик синоптических вихрей. Подтверждены представления о том, что в течение сезонного цикла происходит пространственное перераспределение интенсивности звеньев общей схемы циркуляции моря. Как следствие попеременного усиления циклонических круговоротов на востоке и западе моря, сезонные циклы циркуляции в этих районах отличаются. Интенсивность циркуляции в целом выше в восточной части моря, за исключением весеннего периода, когда усиливается западный круговорот.

Зимняя интенсификация циркуляции моря и ее асимметричность с максимумом в восточной половине моря обусловлена полем завихренности касательного напряжения ветра. Перемещение центра интенсивности циркуляции весной в западную часть моря, при ее общем снижении, вызвано халинным фактором. Это связано с се-

зонным максимумом баланса пресных вод, наиболее выраженного в западной части моря из-за весеннего паводка крупных рек. Амплитуда сезонного хода интенсивности циркуляции вод прямо пропорциональна средней кинетической энергии: высокие значения амплитуд располагаются в зоне действия Основного черноморского течения, по альтиметрическим данным — в районах Керченского и Батумского антициклонов.

Сезонный ход кинетической энергии в квазистационарных антициклонических вихрях тесно связан с сезонным циклом общей циркуляции моря, но имеет свои региональные отличия. Скорость течений во всех вихрях максимальна в зимний период, наибольший размах годового хода кинетической энергии (>20 Дж/м³) отмечается в антициклонах вблизи пр-ва Босфор, Керченского пр-ва, Геленджика, Трабзона.

Сезонную изменчивость завихренности течений в квазистационарных антициклонах можно свести к двум основным типам. Для первого, наиболее типичного, максимум антициклонической завихренности течений приходится на январь-февраль, минимум — на июнь-июль, что соответствует сезонному ходу интенсивности общей циркуляции моря. Второй тип сезонного цикла, который характерен для Севастопольского, Туапсинского, Синопского антициклонов, представляет собой модификацию типичного цикла: максимум сдвигается к началу весны, минимум — к началу осени. В Батумском антициклоне антициклоническая циркуляция наиболее вероятна не зимой, а в весенне-летний период.

Интенсивность вихревой кинетической энергии (ВКЭ) минимальна летом и возрастает в осенне-зимний период. Относительный вклад нестационарных вихрей в общую кинетическую энергию (КЭ), как и степень преобладания вращательной компоненты над деформационной составляющей, наоборот, максимальны в летне-осенний период.

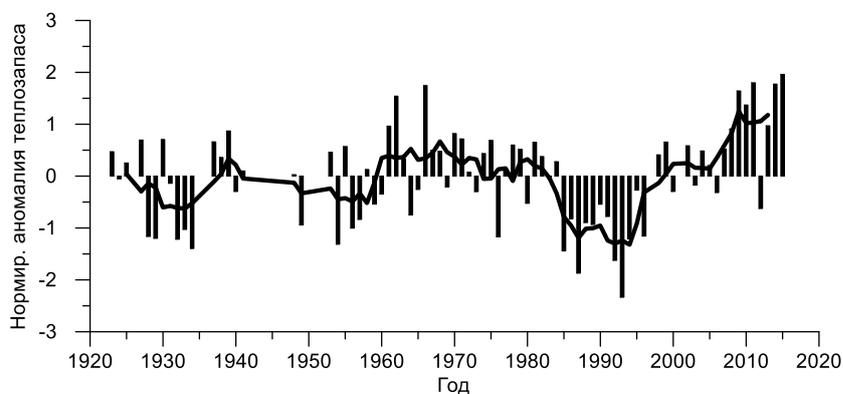
Пятый раздел (78 с.) посвящен климатическим изменениям гидрологического режима Черного моря и поиску связей с внешними факторами.

В подразделе 5.1 рассматривается многолетняя изменчивость термической структуры вод. Общий характер долгопериодных колебаний теплозапаса Черного моря представляет собой циклический процесс без явно выраженного тренда (рис. 15). Выделяются два холодных периода: первый — с середины 1920-х гг. до конца 1950-х гг., и второй — с начала 1980-х гг. до конца 1990-х гг. К теплым относится период 1960–1980 гг. и современный период, начавшийся в конце 1990-х гг.

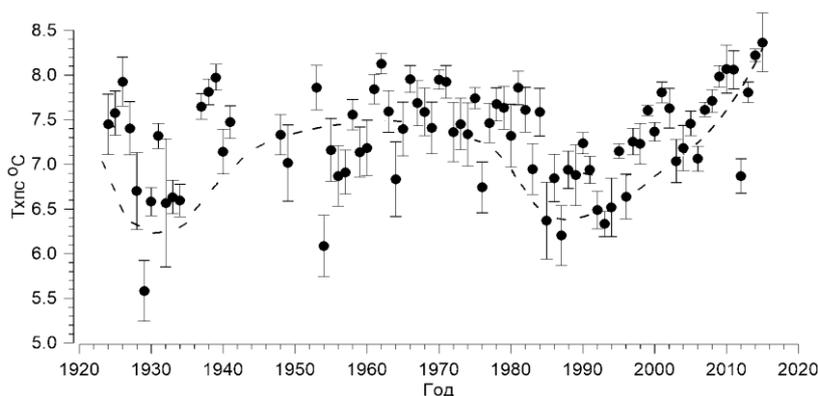
Изменения теплозапаса Черного моря качественно и количественно совпадают с тенденциями в Мировом океане только для периода последних 30 лет ($+0,39 \pm 0,05$ Вт·м⁻² или $0,015^\circ$ С/10 лет), что связано с более поздним переходом (на 10–20 лет) к современному потеплению.

Ведущую роль в низкочастотной изменчивости теплозапаса моря играет интенсивность зимней конвекции. Наиболее выраженные минимумы теплозапаса, такие как в 1920–1930 гг. и в 1985–1995 гг. (рис. 16) возникают после того, как несколько холодных зим следуют друг за другом. Длительность сохранения аномалий температуры, формирующихся зимой, обусловлена, в первую очередь, слабым теплообменом в ХПС, залегающим между сильно стратифицированными сезонным и ос-

новным пикноклинами. Интенсивность обновления вод ХПС в современный период в целом ниже климатической нормы.



Сплошная линия отображает 5-летнее скользящее среднее
 Рис. 15. Нормированные среднегодовые аномалии теплозапаса
 Черного моря относительно периода 1961–1990 гг.



Отрезками изображен разброс значений, соответствующий ± 1 СКО,
 штриховая линия соответствует полиномиальной аппроксимации
 Рис. 16. Температура в ядре ХПС по первичным данным, осредненным
 за период с мая по ноябрь

В среднем, многолетние колебания среднемесячных аномалий объема вод ХПС составляют $\sim 20\%$ его среднего объема, что примерно в 2 раза меньше, чем для сезонных колебаний, но интенсивность межгодовой изменчивости температуры воды выше, чем в сезонном цикле. Для большинства зимних сезонов с высокой интенсивностью обновления ХПС наблюдается сочетание высоких потерь тепла в атмосферу с дополнительными благоприятными факторами: низким теплосодержанием поверхностного слоя перед началом осенне-зимнего охлаждения или слабой вертикальной стратификацией.

В отличие от Мирового океана, многолетняя изменчивость температуры воды в Черном море имеет различный характер в верхнем 50-метровом и в более глубоких слоях. В поверхностных и подповерхностных слоях моря хорошо выражены между-

сятилетние колебания температуры, в глубинных слоях выявлено слабое, но устойчивое нагревание.

Интенсивность межгодовых и десятилетних колебаний температуры воды поверхностного слоя максимальна в северо-западной части моря и в восточном циклоническом круговороте, что обусловлено пространственным распределением межгодовой изменчивости потоков явного и скрытого тепла.

В слое постоянного пикноклина, где многолетняя изменчивость температуры воды превосходит сезонную, ее интенсивность минимальна в центральной части моря и увеличивается в направлении шельфа, что связано с большим проявлением на периферии моря колебаний общей интенсивности циркуляции моря.

Пространственное распределение амплитудно-фазовых характеристик сезонного цикла температуры воды сохраняет свои общие закономерности для различных десятилетних периодов, при увеличении амплитуды сезонного хода уменьшается фаза годовой гармоник. Сезонная амплитуда резко возросла после 1980-х гг. и к настоящему времени достигает максимальных значений ($\sim 9,2^\circ \text{C}$).

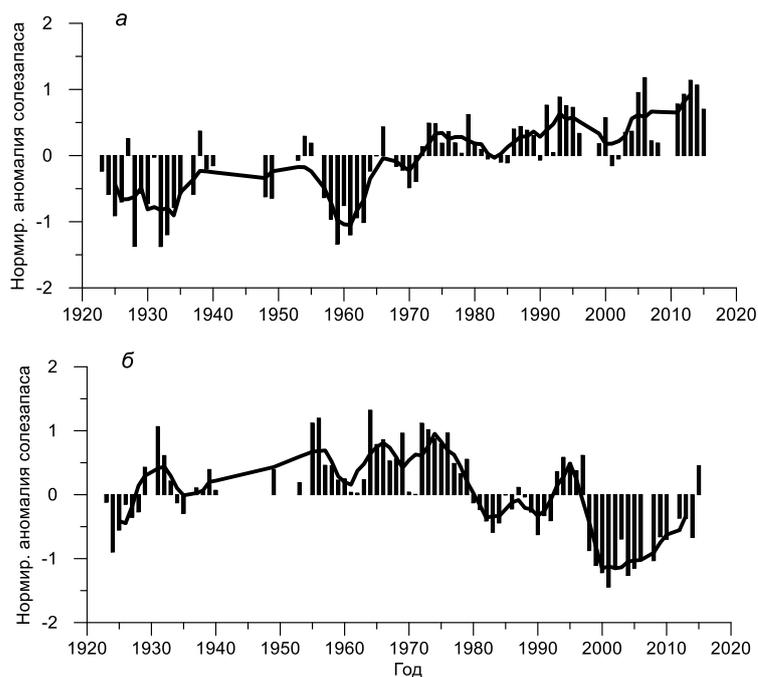
В **подразделе 5.2** рассматривается многолетняя изменчивость халинной структуры вод Черного моря. Общие изменения солезапаса бассейна характеризуются как устойчивое осолонение всего объема вод на протяжении 100-летнего периода (рис. 17а), что интерпретируется как некомпенсированный пресным балансом приток мраморноморских вод. В отличие от температуры воды, где изменчивость в слое 0–50 м является определяющей, основные изменения солезапаса наблюдаются в постоянном галоклине.

В верхнем слое моря хорошо выражены междесятилетние колебания солёности (рис. 17б): от относительно пресного состояния в период 1920–1954 гг. к состоянию повышенного солезапаса в 1954–1980 гг. и снова к пресному состоянию, начиная с 1980-х гг. В настоящее время, после 2010 г., есть признаки тенденции к завершению пресной фазы.

Интенсивность многолетней изменчивости солёности во всех слоях моря превышает интенсивность сезонного хода. Поверхностный максимум изменчивости связан с пресным балансом, промежуточный максимум в постоянном галоклине — с колебаниями интенсивности общей циркуляции моря.

Пространственная картина интенсивности межгодовых и десятилетних колебаний солёности в поверхностном слое отражает влияние основных источников распреснения: изменчивость максимальна в северо-западной, юго-восточной частях моря, а также вблизи Керченского пролива и минимальна в центральной части моря, где баланс пресных вод отрицателен.

Общая закономерность многолетних изменений амплитудно-фазовых характеристик солёности в отличие от температуры воды — положительная корреляция фазы и амплитуды сезонного хода. Увеличение сезонной амплитуды происходит при опреснении моря, при этом возрастает повторяемость не зимнего, а осеннего максимума солёности, что и приводит к увеличению фазы годовой гармоник.



Сплошная линия отображает 5-летнее скользящее среднее

Рис. 17. Нормированные среднегодовые аномалии солёности Черного моря относительно периода 1961–1990 гг.: а) моря в целом; б) слоя 0–50 м

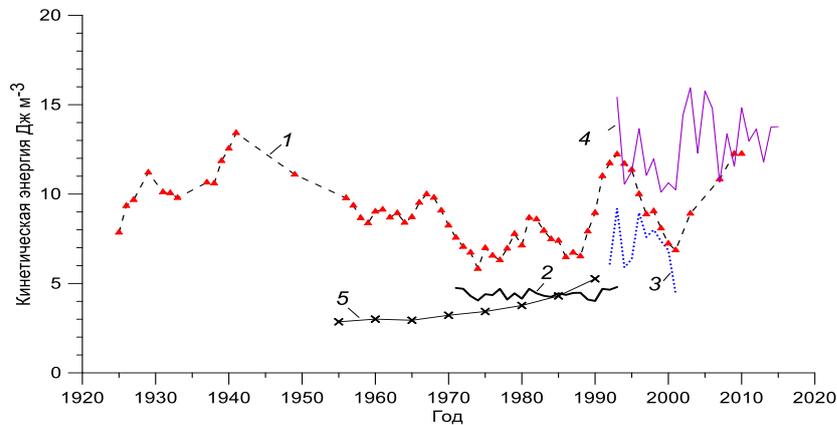
Пространственное распределение вклада годовой гармоник в общую дисперсию сезонного хода солёности сохраняло свои основные черты на протяжении всего XX века: высокие значения — в северной половине моря (60–80 %), низкие — в южной половине (до 20 %). Исключение составляет современный период 2000–2015 гг., когда, при общем снижении доли годовой гармоник, пространственный контраст север–юг сменился контрастом восток–запад.

В подразделе 5.3 представлены характеристики изменений вертикальной и горизонтальной стратификации плотности воды в Черном море. Многолетняя изменчивость плотностной структуры в значительной степени определяется колебаниями вертикальной стратификации солёности. Во времена более пресных периодов (до 1950-х гг. и после 1980-х гг.) перепад плотности в верхнем слое 0–50 м увеличивался в 1,5 раза. Для вертикальной стратификации в слое глубже 100 м прослеживается длительная отрицательная тенденция, что связано с общим потеплением и осолонением основного пикноклина.

В отличие от вертикальной стратификации, характер многолетней изменчивости для горизонтальных градиентов плотности не претерпевает принципиальных изменений при переходе от слоя 0–100 м к постоянному пикноклину и глубинным слоям.

В подразделе 5.4 рассматривается многолетняя изменчивость геострофической циркуляции вод Черного моря. Чередование периодов увеличения / уменьшения кинетической энергии геострофических течений может быть представлено следующим образом: ослабление интенсивности циркуляции моря в 1960–1970 гг., конце 1990-х – начало 2000-х гг. и увеличение интенсивности в 1930–1940 гг., середине 1990-х,

после 2010 г. (рис. 18). Наиболее значимый спектральный пик колебаний значений перепада динамических высот между периферией и центром моря находится в межгодовом диапазоне 2–5 лет, менее выраженный пик — в более низкочастотной области 20–25 лет.



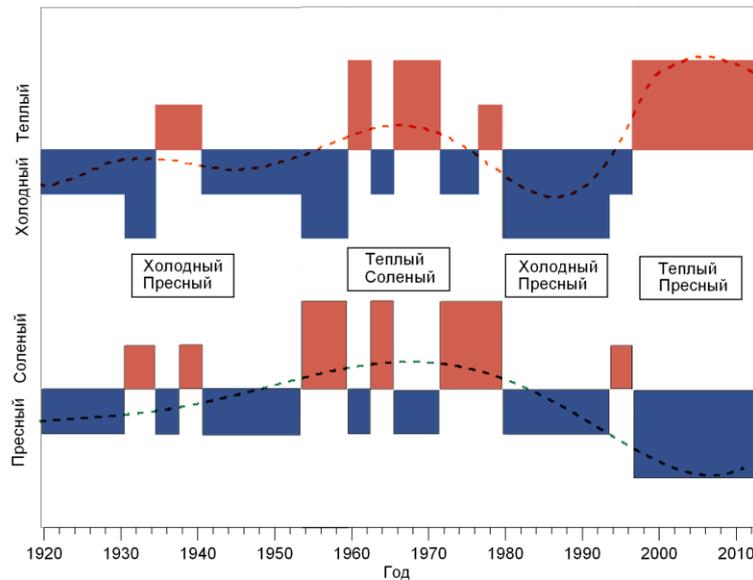
Обозначения: 1 — по TS-реанализу; 2 — по реанализу [Кныш и др., 2011] слой 0–50 м; 3 — по реанализу [Дорофеев, 2009]; 4 — по альтиметрическим данным с коррекцией по методу [Kubryakov, Stanichny, 2011]; 5 — по [Полонский, Шокурова, 2009], февраль слой 0–50 м

Рис. 18. Среднегодовые значения кинетической энергии геострофических течений на поверхности Черного моря

Ряд опубликованных ранее в литературе оценок климатических изменений циркуляции вод в Черном море, такие как разнонаправленные тенденции в поверхностных и в более глубоких слоях, перераспределение интенсивности в годовом цикле, изменение пространственной структуры сезонного цикла течений, не были подтверждены.

Анализ колебаний интенсивности циркуляции по альтиметрическим данным подтверждает высокую степень положительной корреляции КЭ и ВКЭ с завихренностью касательного напряжения ветра. При этом существует заметная отрицательная корреляционная связь с ВКЭ/КЭ, т.е. относительная доля вихревых движений в периоды ослабления общей циркуляции возрастает.

В подразделе 5.5 исследуются изменения обобщенных состояний гидрологического режима Черного моря в XX в. Различные сочетания положительных и отрицательных аномалий тепло- и солезапаса верхнего 100-метрового слоя трактуются как различные фазы гидрологического режима моря, которые группируются на крупные периоды следующим образом: холодный и пресный период в 1920–1954 гг., холодный и соленый в 1954–1960 гг., теплый и соленый в 1960–1980 гг., холодный и пресный в 1980–1996 гг., теплый и пресный, начиная с 1996 г. (рис. 19) Переход из одной гидрологическую фазы в другую происходит после того как в течение определенного периода преобладают межгодовые аномалии теплового или водного баланса соответствующего знака.



Обозначения: Т – теплый, Х – холодный, П – пресный, С – соленый; Высота столбцов отображает относительную интенсивность в 2-х градациях: умеренной и сильной, красный цвет – положительная аномалия, синий цвет – отрицательная аномалия.

Рис. 19. Общая схема чередования фаз гидрологического режима Черного моря

Основным внешним фактором, регулирующим смену гидрологических фаз, является изменение преобладающего режима атмосферной циркуляции: зональной или меридиональной. Периоды преобладания зональной циркуляции атмосферы способствуют снижению пресного баланса и ведут к соленым фазам гидрологического режима.

При преобладании меридиональной циркуляции (рис. 20) избыток поступления пресных вод формирует пресную фазу. Увеличение пресного баланса происходит за счет увеличения стока рек и разности осадки-испарение над морем. Этому благоприятствуют отрицательные фазы атмосферных индексов NAO, EA и EA/WR, при которых увеличивается общее количество циклонов, в особенности южных (средиземноморских).

Отрицательные фазы атмосферных индексов NAO, EA и положительная фаза EA/WR являются индикаторами блокирующих процессов над Европой, при которых происходят частые вторжения на Черное море арктического и континентального воздуха. Интенсивное обновление вод ХПС в течение нескольких зим подряд обеспечивает переход к холодной фазе гидрологического режима. Усиление южного меридионального переноса в атмосфере благоприятствует наступлению теплой фазы.

Переход в разные фазы гидрологического режима сопровождается изменениями различных элементов гидрологической структуры. Прежде всего это относится к плотностной стратификации, как вертикальной, так и горизонтальной, которая обостряется в периоды распреснения моря и ослабляется в периоды осолонения. Из характеристик сезонного цикла температуры и солености наиболее заметную привязанность к фазе гидрологического режима имеет амплитуда сезонного хода в по-

верхностном слое. В периоды осолонения сезонные амплитуды температуры и солености уменьшаются, в периоды опреснения — увеличиваются, что отражает изменения интенсивности вертикального турбулентного обмена при изменениях вертикальной стратификации.

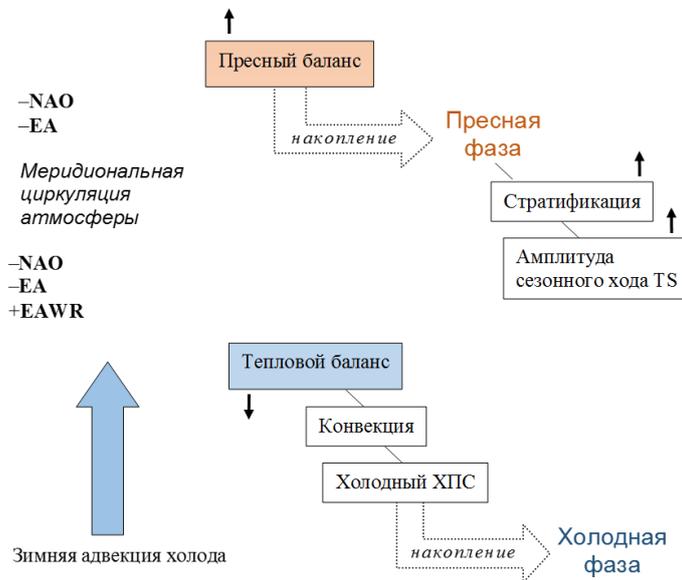


Рис. 20. Общая схема перехода в пресную и холодную фазы гидрологического режима Черного моря

В п. 5.5.2 обсуждаются возможные причины общего осолонения и потепления в постоянном пикноклине и глубинных слоях Черного моря. На протяжении своей геологической истории черноморский бассейн, в зависимости от его связи с Мировым океаном, проходил различные стадии халинного режима — солоноватоводный: 5–13 ‰ (чаудинские, эвксинские бассейны), морской: 15–20 ‰ (карадениз, узунларские, черноморский бассейны), океанический: до 30 ‰ (карангатский бассейн). Положительный тренд солезапаса моря в современный период может свидетельствовать о том, что процесс осолонения бассейна после окончания последнего ледникового периода еще не завершился.

Оценка линейного тренда солезапаса всего объема вод на протяжении столетнего периода составляет $7,58 \pm 1,06 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} / 10 \text{ лет}$ ($0,0038 \text{ ‰} / 10 \text{ лет}$) или в пересчете на прирост массы солей в море $205 \pm 28 \text{ млн. т/год}$, что соответствует дополнительному притоку мраморноморских вод $6 \pm 1 \text{ км}^3 / \text{год}$ ($\sim 3 \%$ от среднего притока). Приблизительную оценку достоверности оценки скорости осолонения моря можно получить, рассчитав период времени T_s , за который солезапас моря уменьшится до значений, соответствующих новоэксинскому бассейну перед началом черноморской трансгрессии. С поправками на неравномерность долгопериодных колебаний уровня Черного моря в послеледниковый период была получена оценка $T_s \approx 12 \text{ тыс. лет}$, что вполне укладывается в рамки представлений о геологической эволюции бассейна, в частности, о времени последнего восстановления связи со Средиземным морем.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертационной работе на основе архивной океанографической информации, данных наблюдений на морской гидрометеорологической сети, спутниковых данных, массивов реанализа атмосферных и гидрофизических полей получены оценки крупномасштабных изменений гидрологического режима Черного моря за 100-летний период и выполнен анализ внешних факторов, влияющих на формирование термохалинной структуры и циркуляции вод.

Основные итоги выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Новые методы реконструкции термохалинных полей бассейна по ограниченному набору данных наблюдений, сочетающие в себе методы оптимальной интерполяции и методы разложения на ЭОФ-функции, позволили получить новые массивы реанализа термохалинной структуры Черного моря за период регулярных наблюдений 1923–2015 гг. и массивы климатических полей для отдельных климатических периодов;

2. Основной причиной региональных отличий климатических изменений в Черном море от других районов Мирового океана является внутриматериковое положение моря, определяющее изолированность, слабый внешний водообмен, двухслойность гидрологической структуры вод и повышенную реакцию бассейна на атмосферные воздействия;

3. Характер многолетней изменчивости термохалинных полей в верхнем 100-метровом слое моря с хорошо выраженными междесятилетними колебаниями резко отличается от тенденций в слое постоянного пикноклина и глубинных слоях, где поступление мраморноморских вод вызывает слабое, но устойчивое нагревание и осолонение. Ведущую роль в низкочастотной изменчивости теплозапаса моря играет интенсивность зимней конвекции. Наиболее выраженные минимумы теплозапаса в 1920–1930 гг. и в 1985–1995 гг. возникали как результат обновления вод ХПС в течение нескольких последовательных холодных зим;

4. Различия характеристик сезонной и межгодовой изменчивости температуры и солености в Черном море связаны с изменением общей интенсивности и перераспределением относительной роли составляющих теплового и водного баланса. Уровни интенсивности межгодовой и сезонной изменчивости баланса пресных вод сопоставимы между собой, в то время как интенсивность межгодовых колебаний внешнего теплового баланса значительно уступает сезонной изменчивости;

5. Различные сочетания положительных и отрицательных аномалий тепло- и солезапаса моря, трактуемые как различные фазы гидрологического режима, формируются слабо согласованными между собой аномалиями теплового и пресного баланса бассейна. Обобщенная последовательность гидрологических состояний Черного моря в XX в. выглядит следующим образом: холодный и пресный период в 1920–1954 гг., холодный и соленый в 1954–1960 гг., теплый и соленый в 1960–1980-гг., холодный и пресный в 1980–1996 гг., теплый и пресный начиная с 1996 г.;

6. Слабая взаимосвязь межгодовых и междесятилетних колебаний составляющих теплового и пресного баланса обусловлена различной степенью зависимости

гидрометеорологических характеристик Азово-Черноморского бассейна от характеристик атмосферной циркуляции. С индексом НАО наиболее тесно связано количество и траектории барических образований, атмосферное давление, речной сток; с индексом ЕА — интенсивность циклонов, количество атмосферных осадков, завихренность ветра, интенсивность зимнего охлаждения; с индексом ЕА/WR — траектории циклонов, речной сток, интенсивность зимнего охлаждения;

7. Основным внешним фактором, регулирующим смену гидрологических фаз в Черном море на десятилетнем масштабе, является изменение преобладающего переноса воздушных масс. Зональная циркуляция способствует снижению притока пресных вод и ведет к наступлению соленой фазы, при преобладании меридиональной циркуляции формируется пресная фаза. Установление теплой или холодной фазы определяются преобладающим направлением меридионального атмосферного переноса в зимний период.

Список публикаций по теме диссертации

1. Булгаков, Н.П. Сезонная изменчивость гидролого-акустических характеристик на шельфе Черного моря у южного побережья Крыма / Н.П. Булгаков, **В.Н. Белокопытов**, П.Д. Ломакин // Морской гидрофизический журнал. – 1996. – № 3. – С. 41–47.

2. **Белокопытов, В.Н.** Атмосферное давление и ветер над Черным морем (1961–1990 гг.) / В.Н. Белокопытов, Г.Ф. Кудрявцева, М.М. Липченко // Тр. УкрНИГМИ – 1998. – Вып. 246. – С. 174–181.

3. Ефимов, В.В. Численное моделирование ветрового волнения при штормовых ситуациях в Черном море / В.В. Ефимов, **В.Н. Белокопытов**, О.М. Комаровская // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 6 – С. 36–44.

4. **Белокопытов, В.Н.** Климатические характеристики скорости звука в северо-восточной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 3. – С. 67–73.

5. Долговременные изменения термохалинных и динамических характеристик Черного моря по климатическим данным температуры и солености и их ассимиляции в модели / В.В. Кныш, Г.К. Коротаев, С.Г. Демышев, **В.Н. Белокопытов** // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 3. – С. 11–30.

6. Программный пакет «Гидроэколог» для обработки экспедиционных данных / **В.Н. Белокопытов** [и др.] // Морской экологический журнал. – 2008. – Т. 7, № 1. – С.17–22.

7. Особенности сезонной изменчивости температуры поверхности и циркуляции вод Черного моря / Ю.В. Артамонов, **В.Н. Белокопытов**, М.В. Бабий, Е.А. Скрипалева // Тр. ЮгНИРО. – 2008. – Т. 46. – С. 102–109.

8. Репетин, Л.Н. Режим ветра над побережьем и шельфом северо-восточной части Черного моря / Л.Н. Репетин, **В.Н. Белокопытов** // Тр. УкрНИГМИ. – 2009. – Вып. 257. – С. 84–105.

9. Численное моделирование динамики Азовского моря при прохождении циклонического атмосферного образования / А.Е. Букатов, Д.Д. Завьялов, **В.Н. Белокопытов**, Т.А. Соломаха // *Метеорология и гидрология*. – 2009. – № 10. – С. 45–53.

10. **Белокопытов, В.Н.** Межгодовая изменчивость обновления вод холодного промежуточного слоя в последние десятилетия / В.Н. Белокопытов // *Морской гидрофизический журнал*. – 2010. – № 5. – С. 33–41.

11. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971–1993 гг. / В.В. Кныш, Г.К.Коротаев, В.А. Моисеенко, А.И. Кубряков, **В.Н. Белокопытов**, Н.В. Инюшина // *Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана*. – 2011. – Т. 47, № 3. – С. 433–446.

12. Розроблення та створення національної колекції морських навігаційних карт і океанографічного атласу Чорного та Азовського морів / С.В. Симоненко, **В.М. Белокопитов**, О.Р. Болтачов, О.М. Борис [и др.] // *Вісн. НАН України*. – 2012. – № 12. – С. 19–27.

13. Ефимов, В.В. Оценка составляющих водного баланса Черного моря / В.В. Ефимов, **В.Н. Белокопытов**, А.Е. Анисимов // *Метеорология и гидрология*. – 2012. – № 12. – С. 69–76.

14. Полонский, А.Б. Десятилетняя изменчивость температуры и солености в Черном море / А.Б. Полонский, И.Г. Шокурова, **В.Н. Белокопытов** // *Морской гидрофизический журнал*. – 2013. – № 6. – С. 27–41.

15. **Белокопытов, В.Н.** Климатическая изменчивость плотностной структуры Черного моря / В.Н. Белокопытов // *Украинский гидрометеорологический журнал* – 2014. – № 14. – С. 227–235.

16. Модель среднегодового вертикального обмена в холодном промежуточном слое Черного моря / А.С. Самодуров, В.А. Иванов, **В.Н. Белокопытов**, О.Е. Кульша // *Процессы в геосредах*. – 2016. – № 2 (6). – С. 141–147.

17. A ventilation of the Black Sea pycnocline on seasonal and interannual time scales / L. Ivanov, **V.N. Belokopytov**, E. Özsoy, A. Samodurov // *Mediterranean Marine Science*. – 2000. – Vol. 1/2. – P.61–74.

18. Water transport in the Bosphorus Straits estimated from hydro-meteorological and altimeter data: Seasonal to decadal variability / E. Peneva, E. Stanev, **V. Belokopytov**, P.-Y. Le Traon // *Journal of Marine Systems* – 2001. – Vol. 31. – P. 21–33.

19. Modelling the distribution of nitrogen species and isotopes in the water column of the Black Sea / S.K. Konovalov, C.A. Fuchsman, **V. Belokopitov**, J.W. Murray // *Marine Chemistry*. – 2008. – Vol. 111, Iss.1–2. – P. 106–124.

20. Contribution of the Black Sea observing system to ECOOP / G.K. Korotaev, V.L.Dorofeev, S.V. Motyzhev, **V.N. Belokopytov** [et al.] // *Ocean Science Discussion* – 2011. – Vol. 8. – P. 1695–1722.

21. Иванов, В.А. Океанография Черного моря / В.А. Иванов, **В.Н. Белокопытов**. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – 212 с. – ISBN 978-966-022-6165-5.

22. **Белокопытов, В.Н.** Климатические изменения гидрологического режима Черного моря / В.Н. Белокопытов // *Изменения земных систем в Восточной Европе / под ред. П.Я. Гройсмана, В.И. Лялько* – Киев, 2010. – С. 478–495.

23. **Белокопытов, В.Н.** Долгопериодные изменения гидрологического режима Черного моря: устойчивое состояние и климатические сдвиги / В.Н. Белокопытов // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря / под ред. В.Н. Еремеева, С.К. Коновалова. – Севастополь: НАН Украины, Морской гидрофизический институт, 2012. – С. 203–222.

24. **Белокопытов, В.Н.** Термохалинная структура вод шельфа / В.Н. Белокопытов // Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 2: Черное море / Ильин Ю.П. [и др.] – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – Гл. 7 – С.205–259.

25. Самодуров, А.С. Вертикальный обмен термохалинными и химическими компонентами в деятельном слое Черного моря / А.С. Самодуров, **В.Н. Белокопытов**, Л.В. Глобина // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / под ред. В.А. Иванова, В.А. Дулова. – Севастополь: НАН Украины, Морской гидрофизический институт, 2014. – С. 373–384.

26. Polonsky, A. Variability of northwestern Black Sea hydrography and river discharges as a part of global ocean-atmosphere fluctuations / A. Polonsky, E. Voskresenskaya, **V. Belokopytov** // Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea / eds. E. Ozsoy, A. Mikaelyan. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. – NATO ASI ser. 2. Environment – Vol. 2/27 – P.11–24.

27. Physical, Chemical and Biological Data Sets of the TU Black Sea Data Base: Description and Evaluation / L. Ivanov, S. Konovalov, V. Melnikov, A. Mikaelyan, O. Yunev, O. Basturk, **V. Belokopytov** [et al.] // Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea / edit. L. Ivanov, T. Oguz – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. – NATO Sci. ser. 2. Environment security – Vol. 1/47 – P. 11–38.

28. The Bosphorus Strait: Exchange Fluxes, Currents and Sea-Level Changes / E. Özsoy, M.A. Latif, S. Besiktepe, N. Cetin, M.C. Gregg, **V. Belokopytov**, Yu. Goryachkin, V. Diakonu // там же. – Vol. 2/47. – P.1–28.

29. **Belokopytov, V.** Long-Term Variability of Cold Intermediate Layer Renewal Conditions in the Black Sea. / V. Belokopytov // там же. – Vol. 2/47 – P. 47–52.

30. Regional Peculiarities of Physical and Chemical Responses to Changes in External Conditions within the Black Sea Pycnocline: Cooling Phase / L.I. Ivanov, S.Konovalov, **V. Belokopytov**, E. Özsoy // там же. – Vol. 2/47 – P. 53–68.

31. Fluctuations of pelagic species of the open Black Sea during 1980–1995 and possible teleconnections / U. Niermann, A.E. Kideys, A.V. Kovalev, V. Melnikov, **V. Belokopytov** // Environmental Degradation of the Black Sea: Challenges and Remedies / edit. S. Besiktepe [et al.]. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. – NATO Sci. ser. 2. Environment security – Vol. 56 – P. 147–173.

32. Physical oceanography studies / Y.P. Ilyin, **V.N. Belokopytov**, E.M. Lemeshko, S.V. Stanichniy // Marine Environmental Assessment of the Black Sea. –Vienna: IAEA, 2004. – P. 43–72.

33. Information products to study environmental threats and dangerous phenomena in the Black, Azov and Caspian Seas / **V.N. Belokopytov** [et al.] // Integration of Information for Environmental Security / edit. H. Gonca Coskun. – Dordrecht: Springer, 2008. – P. 91–104.

34. **Белокопытов, В.Н.** Сезонная изменчивость термохалинной и гидролого-акустической структуры вод Черного моря / В.Н. Белокопытов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – Вып. 8. – С. 12–22.

35. Пухтяр, Л.Д. Сезонная и пространственная изменчивость термохалинной структуры вод Каркинитского залива / Л.Д. Пухтяр, Ю.П. Ильин, **В.Н. Белокопытов** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – Вып. 8. – С.48–63.

36. Репетин, Л.Н. Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма / Л.Н. Репетин, **В.Н. Белокопытов**, А.И. Липченко // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – Вып. 9. – С. 13–28.

37. Репетин, Л.Н. Режим ветра северо-западной части Черного моря и его климатические изменения / Л.Н. Репетин, **В.Н. Белокопытов** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – Вып. 17. – С.225–243.

38. Фоновые характеристика и сезонная изменчивость вертикальной стратификации термохалинного поля у побережья Севастополя / **В.Н. Белокопытов** [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. – Вып. 1 (6). – С. 22–28.

39. **Белокопытов, В.Н.** Применение геоинформационной системы «Гидрометеорология Черного и Азовского морей» для комплексного анализа океанографических съемок / В.Н. Белокопытов // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАНУ, 2002. – С. 200–204.

40. Сизов, А.А. Особенности гидрометеорологических полей Черного моря в фазу спада 11-летнего цикла солнечной активности / А.А. Сизов, **В.Н. Белокопытов** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – Вып. 10. – С.109–118.

41. **Белокопытов, В.Н.** Течения прибрежной зоны на участке Крымского полуострова от мыса Сарыч до поселка Качивели / В.Н.Белокопытов, А.А. Саркисов, С.В. Щуров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – Вып. 8. – С. 64–68.

42. Сравнительный анализ изменчивости гидрологических характеристик вод северо-западного шельфа и центральной части моря / И.Г. Шокурова, Т.В. Пластун, **В.Н. Белокопытов**, А.Х. Халиулин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 10. – С. 17–26.

43. Цифровой атлас «Физическая океанография Черного моря» / А.М. Суворов, В.Н. Еремеев, **В.Н. Белокопытов**, А.Х. Халиулин [и др.] // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – С.125–129.

44. **Белокопытов, В.Н.** Оценки междесятилетней изменчивости температуры и солености в Черном море в период 1951–1995 гг. / В.Н. Белокопытов, И.Г. Шокурова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – Вып. 12. – С. 12–21.

45. Ильин, Ю.П. Сезонная и межгодовая изменчивость параметров холодного промежуточного слоя в области Севастопольского антициклонического круговорота / Ю.П. Ильин, **В.Н. Белокопытов** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – Вып. 12. – С. 28–41.

46. Артамонов, Ю.В. Сезонная динамика крупномасштабных циклонических круговоротов Черного моря / Ю.В. Артамонов, **В.Н. Белокопытов**, Е.А. Скрипалева // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – С. 268–270.

47. Самодуров, А.С. Стационарная модель вертикального обмена в Черном море для реальной геометрии бассейна / А.С. Самодуров, О.Е. Кульша, **В.Н. Белокопытов** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – Вып. 14. – С. 517–523.

48. **Белокопытов, В.Н.** Сезонная и межгодовая изменчивость завихренности поля ветра над Черным морем по данным архивных синоптических карт / В.Н. Белокопытов // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – С.176–178.

49. **Белокопытов В.Н.** Оценка субдукции вод на верхней границе основного пикноклина в Черном море по климатическим данным / В.Н. Белокопытов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – Вып. 15. – С.21–27.

50. Моисеенко, В.А. Оценка качества массива данных гидрологических измерений подготовленного для решения задачи реанализа состояния Черного моря 1985–1994 гг. / В.А. Моисеенко, **В.Н. Белокопытов** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – Вып. 16. – С.184–189.

51. Тенденции в изменчивости термохалинных и динамических характеристик Черного моря, выявленные по результатам реанализа за период 1985–1994 гг. / В.В. Кныш, А.И. Кубряков, В.А. Моисеенко, **В.Н. Белокопытов** [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – Вып. 16. – С.277–290.

52. Подсистема обеспечения пользователей океанографической информацией геоинформационной системы Черного моря / В.Н.Еремеев, А.Х. Халиулин, Е.А. Гордин, А.В. Ингеро, **В.Н. Белокопытов** [и др.] // Экологическая безопасность при-

брежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 18. – С. 75–86.

53. Изменчивость пространственного распределения частоты плавучести и характеристик внутренних волн в Черном море / А.Е.Букатов, М.В. Бабий, **В.Н. Белокопытов**, Е.А. Моисеева // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 18. – С. 130–140.

54. **Белокопытов, В.Н.** О десятилетней изменчивости температуры и солёности в слое постоянного пикноклина в Черном море / В.Н. Белокопытов, И.Г. Шокурова, А.Б. Полонский // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – С. 223–225.

55. **Белокопытов, В.Н.** О методе восстановления термохалинной структуры Черного моря на основе эмпирических ортогональных функций / В.Н. Белокопытов // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – Вып. 17. – С.94–99.

56. **Белокопытов, В.Н.** Статистический анализ термохалинных полей Черного моря по данным буев-профилемеров ARGO / В.Н. Белокопытов, А.В. Багаев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – Вып. 26 (2). – С.128–142.

57. **Белокопытов, В.Н.** О климатической изменчивости термохалинной структуры Черного моря / В.Н. Белокопытов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. – Вып. 27. – С. 226–230.

58. **Белокопытов, В.Н.** Устойчивые антициклонические вихри у южного и западного побережья Крыма / В.Н. Белокопытов, Н.В. Никольский // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – Севастополь: МГИ РАН, 2015. – Вып. 1. – С. 47–53.

59. Атлас. Автономна республіка Крим. Чорне та Азовське моря. – Київ-Сімферополь: Таврійський національний університет, Інститут географії НАН України, 2003. – С. 42.

60. Національний Атлас України. Розділ 13. Моря та їхні ресурси – К., «Картографія». – 2008. – С. 231–241.

61. Океанографічний атлас Чорного та Азовського морів. – К., ДУ «Держгідрографія», 2009. – 365 с.

62. Digital Atlas: Physical Oceanography of the Black Sea / A.M. Suvorov, V.N. Eremeev, **V.N. Belokopytov**, A.H. Khaliulin, E.A. Godin, A.V. Ingerov, D.R. Palmer, S.Levitus // Environmental Services Data and Information Management Program. – Sevastopol: Marine Hydrophysical Institute, 2004. – CD-ROM.

63. **Белокопытов, В.Н.** О пространственной статистической структуре термохалинных полей Черного моря / В.Н. Белокопытов, А.Б. Полонский // Морские технологии и приборостроение: науч.-техн. семинар (Севастополь, 1993 г.) : тез. докл. – Севастополь: МГИ АН Украины, 1993. – С. 25–26.

64. **Белокопытов, В.Н.** Компьютерный атлас гидролого-акустических характеристик Черного моря / В.Н. Белокопытов, Н.П. Булгаков // Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря (Севастополь, 1997 г.) : сб. тр. конф. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1997. – С. 122.
65. Шокурова, И.Г. Изменчивость температуры и солености в Черном море в период 1951-1995 гг. / И.Г. Шокурова, **В.Н. Белокопытов** // Международная конференция «Современное состояние экосистемы Черного и Азовского морей» (Крым, Донузлав, 2005 г.) : тез. докл. – Севастополь, 2005. – С. 157.
66. Polonsky, A. Low-frequency variability of hydrological fields in the North West Black Sea / A. Polonsky, **V. Belokopytov**, G. Dzhiganshin // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to Anthropogenic and Climatic Changes (Varna, Bulgaria, 1995) : proc. – Varna, 1995.
67. **Belokopytov, V.N.** Decadal changes of the Black Sea hydrographic fields / V.N. Belokopytov, A.B. Polonsky, B.A. Yurchuk // *Annales Geophysicae*. – 1997. – Vol. 15, Suppl II. – P. C489.
68. **Belokopytov, V.N.** "Oceanographer": applied software for oceanographic surveys / V.N. Belokopytov // International Symposium on Information Technology in Oceanography (ITO-98) (Goa, India, 1998) : abstr. – Goa, 1998. – P. 79.
69. **Belokopytov, V.N.** GIS "Hydrometeorology of the Black Sea and Sea of Azov" / V.N. Belokopytov // там же. – P.30.
70. Ivanov, L.I. Winter mixing events in the Black Sea / L.I. Ivanov, **V. Belokopytov** // IUGG-99 conference (Birmingham, U.K., 1999) : abstr. – Birmingham, 1999. – P11/E/23-B5 1420, P. B234.
71. **Belokopytov, V.** Sea level changes in the Black sea (1923-1997) / V. Belokopytov, Yu. Goryachkin // IOC workshop report: Ocean circulation science derived from the Atlantic, Indian and Arctic sea level networks. – UNESCO, 2000. – No. 171 – P. 88–92.
72. **Belokopytov, V.N.** Marine information system in oceanography and meteorology of the Black Sea / V.N. Belokopytov // International conference Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea. Similarities and differences of two interconnected basins (Athens, Greece, 1999) : abstr. – Brussels: European Commission report, 2000 – P. 419.
73. **Belokopytov, V.N.** The water balances of the Black Sea as a basin for study of the derived pollutants budget in surrounding basins and its influence onto the marine environment / V.N. Belokopytov, V.G. Simov, M.M. Lipchenko // там же. – P. 135.
74. Özsoy, E. Atmosphere-ocean fluxes, climatic variability and exchanges between the Eastern Mediterranean and the Black Sea / E. Özsoy, L.I. Ivanov, **V.N. Belokopytov** // там же. – P. 193.
75. **Belokopytov, V.N.** Regional GIS "Hydrometeorology of the Black Sea" / V.N. Belokopytov // EGS 2000, XXV General Assembly European Geophysical Society (Nice, France, 2000) : abstr. – Nice, 2000.
76. Maderich, V. Modelling of the Dardanelles outflow to the Aegean Sea / V. Maderich, **V. Belokopytov**, V. Zervakis // там же.

77. **Belokopytov, V.N.** Long-term sea level variability in the Black Sea / V.N. Belokopytov, Yu. Goryachkin // там же.
78. **Belokopytov, V.** Black Sea as a hydrographic opposite to Mediterranean Sea / V. Belokopytov // 2001: An Ocean Odyssey, Joint Assemblies IAPSO-IABO (Mar del Plata, Argentina, 2001) : abstr. – Mar del Plata, 2001.
79. **Belokopytov, V.** Seasonal and interannual variability of strong winds and storms in the Black Sea / V. Belokopytov // Second international conference Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea. Similarities and differences of two interconnected basins (Ankara, Turkey, 2002) : abstr. – Ankara, 2002. – P. 450.
80. **Belokopytov, V.N.** Decadal variability of the Black Sea pycnocline / V. Belokopytov // Scientific and policy challenges towards an effective management of the marine environment. Emphasis on the Black Sea and the Mediterranean regions (Varna, Bulgaria, 2003) : abstr. – Varna, 2003. – P. 277.
81. Creation the new database in the framework of “Rescue of Black Sea hydrological data for regional classification and studies of seasonal and interannual variability” project / A.M. Suvorov [et al.] // там же. – P. 381.
82. Digital atlas and evaluation of the influence of interannual variability on climate analyses / A.M. Suvorov [et al.] // Oceans Conference Record (IEEE) : proc. – San Diego, 2003. – Vol. 2, P. 990–995.
83. Rescue of Black Sea hydrological data for regional classification and studies of seasonal and interannual variability / A.M. Suvorov [et al.] // там же. – Vol. 5, P.2741–2744.
84. **Belokopytov, V.** Ocean Station Tool: Software package for processing and analysis of oceanographic data / V. Belokopytov // Conference International Marine Data and Information – IMDIS (Brest, France, 2005) : abstr. – Brest, 2005. – P. 67.
85. **Belokopytov, V.** GIS “Hydrometeorology of the Black and Azov Seas” / V. Belokopytov // там же. – P. 82.
86. Oceanographic Database Management System / A. Khaliulin, **V. Belokopytov**, E. Godin, A. Ingerov, D. Palmer // там же. – P. 51.
87. **Belokopytov, V.N.** Interannual variability of the Black Sea water masses volume / V.N. Belokopytov // Black Sea ecosystem 2005 and beyond (Istanbul, Turkey, 8–10 May 2006) : abstr. – Istanbul, 2006. – P. 6.
88. Shokurova, I.G. Interdecadal variability of temperature and salinity the Black Sea / I.G. Shokurova, **V.N. Belokopytov** // там же. – P. 18.
89. **Belokopytov, V.N.** Information products to study environmental threats and dangerous phenomena in the Black and Caspian Seas / V.N. Belokopytov // NATO Advanced Research Workshop Integrated Information for Security (Istanbul, 2006) : abstr. – Istanbul, 2006. – P. 23.
90. Data management dedicated for assessing and modeling of the Mediterranean and Black Seas ecosystem changes (SESAME integrated projects) / I. Gertman, [et al.] // International Marine Data and Information Systems Conference IMDIS-2008 (Athens, 2008) : abstr. – Athens, 2008. – P. 71–72.

91. Gertman, I. Desktop version of database management system for MEDACC / I. Gertman, **V. Belokopytov** // там же. – P. 228.
92. Multidisciplinary marine cast data management system for SESAME EU project / I. Gertman, [et al.] // International Marine Data and Information Systems Conference IMDIS 2010 (Paris, 2010) : abstr. – Paris, 2010. – P. 73–74.
93. Effect of variations in meteorological forcing on circulation in the Black Sea / G. Shapiro [et al.] // 14th Biennial Challenger Conference for Marine Science (Southampton, 2010) : abstr. – Southampton: National Oceanography Centre. – P. 103.
94. **Belokopytov, V.N.** Climatic changes of the Black Sea thermohaline structure / V.N. Belokopytov, A.B. Polonsky // International conference Marine Research Horizon 2020 (Varna, 2013) : abstr. – Varna, 2013. – P. 138.
95. Regional project (PERSEUS) oriented system for storage and operative exploration of Mediterranean and Black Sea cast data / I. Gertman Y. Krivenko, T. Ozer, **V. Belokopytov**, A. Ingerov and A. Khaliulin // International Conference on Marine Data and Information Systems (Lucca, Italy, 2013). – An International Journal of Earth Sciences. – Vol. 54 suppl.: IMDIS 2013. – P. 136–137.
96. PERSEUS oriented system for storage and operative exploration of Mediterranean and Black Sea cast data / I. Gertman [et al.] // PERSEUS Scientific Abstract : abstr. – Athens, 2014. – P. 14.