На правах рукописи

Сухонос Павел Алексеевич

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ВЕРХНЕГО ПЕРЕМЕШАННОГО СЛОЯ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ, И СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Севастополь – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении Институт природно-технических систем.

Научный руководитель: **Полонский Александр Борисович,** член-корреспондент Российской академии наук, доктор географических наук, профессор, научный руководитель Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт природно-технических систем»

Официальные оппоненты: **Крупчатников Владимир Николаевич,** доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук»

Фомин Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»

Защита состоится 27 января 2021 г. в 11–00 ч. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.231.02 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт природно-технических систем» и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» и на сайте www.ипто.рф.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук В.П. Евстигнеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Океан играет ключевую роль в формировании и изменчивости климатической системы (см., например, [Bjerknes, 1964; Монин, 1982]). Он навязывает ей определенные пространственно-временные масштабы изменчивости за счет процессов, изменяющих характеристики теплообмена океана с атмосферой и температуру верхнего перемешанного слоя (ВПС) [Полонский, 2008]. ВПС – это сильно турбулизированный слой вод, примыкающий к свободной поверхности океана. Основные гидрофизические характеристики среды в пределах этого слоя распределены однородно по вертикали [Калацкий, 1978].

Вне областей струйных течений локальное изменение температуры ВПС на масштабах от сезонного до межгодового в основном определяется потоками тепла на поверхности океана, а на более длительных временных масштабах регулируется в значительной степени нелокальными процессами адвекции тепла и горизонтального перемешивания [Kraus, Morrison, 1966; Воскресенская, Полонский, 1993; Gulev et al., 2013]. Анализ теплового баланса ВПС Северной Атлантики и его отдельных компонентов проводился в ряде работ (см., например, [Liu, Opsteegh, 1995; Sukhovey, Camara, 1995; Moshonkin, Diansky, 1995; Christoph et al., 2000; Dong, Kelly, 2004; Evan et al., 2009; Buckley et al., 2014; Roberts et al., 2017; Nogueira Neto et al., 2018]). Основные механизмы долгопериодной изменчивости температуры ВПС изучены достаточно хорошо. Однако вопрос об относительной важности составляющих теплового баланса ВПС на сезонном и межгодовом масштабах все ещё остается дискуссионным, в том числе из-за отсутствия длительных наблюдений в океане с необходимым пространственно-временным разрешением.

Изменение интенсивности зональной циркуляции над Северной Атлантикой и смещение центров действия атмосферы приводят к формированию погодно-климатических аномалий в Атлантико-Европейском регионе [Kozuchowski, 1993; Полонский, 2001]. Один из важнейших климатических сигналов, определяющих межгодовую изменчивость крупномасштабной циркуляции атмосферы в Северной Атлантике, – это Североатлантическое колебание (САК) [Wallace,

Gutzler, 1981; Barnston, Livezey, 1987; Mächel et al., 1998]. Анализу ключевых особенностей САК и его проявления в характеристиках атмосферы и океана посвящена обширная литература (см., например, [Marshall et al., 2001; Visbeck et al., 2003; Джиганшин, Полонский, 2003; Полонский и др., 2004; Hurrell, Deser, 2010; Нестеров, 2013] и библиографию в них). Однако, несмотря на многолетние исследования САК, ряд вопросов, связанных с механизмом формирования межгодовых вариаций характеристик североатлантической системы океан-атмосфера, остается открытым. Причем детальный анализ взаимодействия САК и характеристик ВПС Северной Атлантики на межгодовом масштабе с использованием длительных данных нескольких ре-анализов и замкнутого уравнения баланса тепла ВПС ранее не выполнялся.

Таким образом, выяснение относительной роли составляющих теплового баланса ВПС Северной Атлантики в формировании аномальной структуры ВПС на межгодовом масштабе на основе анализа замкнутого уравнения баланса тепла ВПС, однородных и длительных массивов данных, а также характера взаимосвязи ВПС с САК представляется особо актуальной задачей.

Объект исследования – тепловой баланс ВПС вод северной части Атлантического океана между 0° и 70° с. ш. и САК.

Предмет исследования – межгодовая изменчивость составляющих теплового баланса ВПС Северной Атлантики и её взаимосвязь с САК.

Цель работы – установить основные закономерности формирования межгодовой изменчивости характеристик ВПС в Северной Атлантике и механизм взаимодействия ВПС с САК с использованием замкнутого уравнения теплового баланса верхнего слоя горизонтально-неоднородного океана и многолетних данных ре-анализов атмосферы и океана.

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие **научные задачи**:

1. Проанализировать относительную роль различных компонентов замкнутого теплового баланса в формировании межгодовых вариаций как среднегодовой температуры ВПС, так и температуры ВПС в разные сезоны.

2. Оценить вклад различных слагаемых, описывающих аномалии адвективного переноса тепла, в суммарные аномалии горизонтальной адвекции тепла в ВПС Северной Атлантики на межгодовом масштабе.

3. Выявить взаимосвязь межгодовой изменчивости характеристик ВПС Северной Атлантики с САК.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 25.00.30 – «Метеорология, климатология, агрометеорология» по пунктам 3. «Взаимодействие атмосферы и океана, явление Эль-Ниньо и глобальная атмосфера» и 10. «Пограничные слои в атмосфере и океане», отрасль наук – физико-математические науки.

Научная и практическая значимость результатов. Результаты, представленные в диссертации, направлены на решение фундаментальной научной проблемы в области анализа физических процессов, обуславливающих особенности и эволюцию аномальной структуры ВПС океана и характеристик приводного слоя атмосферы на межгодовом масштабе. Исследование механизмов, формирующих пространственно-временную изменчивость параметров ВПС океана, является необходимым этапом в изучении физики взаимодействия атмосферы и океана. При этом аномалии характеристик ВПС представляют собой индикатор такого взаимодействия. Полученные в диссертационной работе выводы позволяют лучше понять закономерности развития межгодовых аномалий характеристик ВПС и их взаимосвязи с аномальным состоянием приводного слоя атмосферы. Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они могут быть использованы при решении задач долгосрочного прогноза погоды и короткопериодных вариаций климата, а также включены в соответствующие учебные программы университетских курсов.

Диссертация выполнялась в рамках реализации плановых исследований по базовым темам государственных заданий ИПТС (№ 0012-2014-0009, № 0012-2019-0002), при поддержке грантов РФФИ (№ 15-05-02019, № 16-35-50169, № 17-35-50028) и РНФ (№ 17-17-01295). Результаты работ по теме диссертации вошли составной частью в отчеты по этим темам и грантам.

Материалы и методы исследования. Работа выполнена на основе компьютерной обработки большого объема данных ре-анализов (ORA-S3, GFDL, GODAS), контактных наблюдений из Мирового банка океанографических данных и атмосферных характеристик с применением современных объективных методов обработки данных и математической статистики.

Основные **положения, выносимые на защиту,** содержат результаты, полученные автором впервые, что и определяет **научную новизну** результатов диссертационной работы, которая состоит в следующем:

1. На основании анализа замкнутого уравнения теплового баланса ВПС и нескольких исторических массивов данных установлена относительная роль различных физических механизмов в формировании межгодовых аномалий характеристик ВПС Северной Атлантики. Впервые показано, что взаимодействие сезонных флуктуаций полей скорости течений и градиентов температуры ВПС обусловливает до 50% изменчивости среднегодовой температуры ВПС в центральной части Тропической Атлантики. Обнаружено, что потоки тепла на нижней границе ВПС определяют до 25% межгодовой изменчивости теплозапаса ВПС в окрестности Межпассатного противотечения в весенне-летний период.
2. Количественно оценены вклады изменений интенсивности течений и вариаций градиентов температуры ВПС в межгодовую изменчивость горизонтальной адвекции тепла в ВПС Северной Атлантики, а также общая величина адвективных теплопереносов и их вклад в баланс тепла верхнего слоя океана на межгодовом масштабе. Впервые получены вклады различных физических механизмов в общий адвективный теплоперенос в ВПС для всех основных течений Северной Атлантики и различных сезонов.
3. Развит механизм поддержания САК, связанный с взаимодействием ВПС Северной Атлантики и приводного слоя атмосферы на межгодовом масштабе. Его суть сводится к следующему. Аномалии характеристик ВПС, сформированные межгодовыми вариациями САК в центральной и восточной частях Северной Атлантики, эволюционируют под влиянием адвективных и диффузионных процессов. Этот механизм способствует распространению океанического сигнала к центрам действия атмосферы. Аномалии характеристик ВПС сопровождаются аномалиями теплообмена океана с атмосферой, особенно выраженными в районе

этих центров, а также в окрестности интенсивных течений, и вызывают смену фазы САК на противоположную. Полный цикл взаимодействия САК с межгодовыми аномалиями характеристик ВПС с учетом времени их адвективного переноса составляет около 8 лет.

Достоверность полученных результатов обеспечивается: (1) использованием современных данных из трех независимых массивов ре-анализов и данных контактных наблюдений из Мирового банка океанографических данных; (2) применением замкнутого уравнения теплового баланса, выведенного для горизонтально-неоднородного океана с переменной по пространству и времени толщиной ВПС; (3) оценкой погрешностей расчета величин отдельных компонентов баланса тепла ВПС и их вклада в суммарный тепловой баланс. Все полученные в диссертации результаты дополняют друг друга и развивают современные представления о динамике системы океан-атмосфера.

Личный вклад автора. Все научные результаты диссертационной работы получены при непосредственном участии автора. Соискатель активно участвовал в обсуждении и интерпретации результатов, подготовке научных публикаций, лично представлял результаты на научных конференциях, семинарах и школах.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинарах МГИ НАН Украины (2012–2014 гг.), ИВМ РАН (2017 г.) и Гидрометцентра России (2018 г.), семинарах Лаборатории морских климатических исследований ИПТС (2015–2019 гг.), общеинститутском научном семинаре ИПТС (2020 г.).

Автор представлял результаты на следующих международных и всероссийских научных конференциях, школах и семинарах: XXI и XXIV международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики» (Севастополь, 2013, 2016 г.); международной научной конференции «Интегрированная система мониторинга Черного и Азовского морей» (Севастополь, 2013 г.); XII международной студенческой научно-технической конференции «Математические методы в механике, экономике, экологии» (Севастополь, 2014 г.); международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Севастополь, 2014–2016 г.); школе-

конференции молодых ученых «Изменения климата и окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация» (Кисловодск, 2014 г.); всероссийской научно-практической молодежной конференции «Экологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление прибрежной зоной» (Севастополь, 2014 г.); XIII международной конференции «Современные концепции научных исследований» (Москва, 2015 г.); 19-ой международной школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» (Туапсе, Шепси, Краснодарский край, 2015 г.); 2015 International Geographical Union Regional Conference (Москва, 2015 г.); III всероссийской конференции по прикладной океанографии (Москва, 2015 г.); IV международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU» (Москва, 2015 г.); международной научно-технической конференции «Системы контроля окружающей среды» (Севастополь, 2015–2019 г.); международной научной конференции «Окружающая среда и человек» памяти чл.-корр. РАН Д.Г. Матишова (Ростов-на-Дону, 2016 г.); I международной научно-технической конференции «Современные проблемы термогидромеханики океана» (Москва, 2017 г.); 2–4-ой международной научной школе молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2016–2018 г.).

Публикации. Научные результаты диссертации опубликованы в 18 статьях: 6 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации; 5 статей, входящих в наукометрические базы Scopus и Web of Science; 2 статьи 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 субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя»; 5 статей, входящих в наукометрическую базу РИНЦ. Кроме этого, опубликовано 24 тезиса докладов, представленных на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Каждая глава разбита на параграфы, включая обзор к главе и выводы к ней. Объем диссертации составляет 165 страниц, в том числе 29 рисунков и 1 таблица. Список литературы включает 257 наименований.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю, чл.-корр. РАН, д. г. н., проф. А.Б. Полонскому. Автор глубоко благодарен д. г. н. Е.Н. Воскресенской, д. ф.-м. н. Н.А. Дианскому, д. ф.-м. н. А.А. Зеленько, д. г. н. Е.С. Нестерову и д. ф.-м. н. Ю.Д. Реснянскому за внимательное отношение и полезные обсуждения результатов работы. Автор признателен д. т. н. В.А. Гайскому и д. т. н. Л.А. Краснодубцу за ценные советы. Автор благодарит к. ф.-м. н. В.П. Евстигнеева за многочисленные консультации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приведена общая характеристика работы, включающая обоснование актуальности темы, определение цели и задач исследования, основные положения, выносимые на защиту, научную новизну и практическую значимость, личный вклад автора и апробацию результатов исследования.

Глава 1 посвящена анализу данных и методов исследования, а также сезонных изменений компонентов баланса тепла ВПС Северной Атлантики. В **параграфе 1.1** приводится краткая характеристика используемых массивов данных ре-анализов ORA-S3 (1959–2011 гг.), GFDL (1961–2015 гг.) и GODAS (1980–2018 гг.). Указанные ре-анализы выбраны, потому что в их массивах содержатся все гидрофизические характеристики, необходимые для расчета компонентов баланса тепла ВПС за достаточно длительный период.

В **параграфе 1.2** приведен вывод уравнения теплового баланса ВПС и дана оценка погрешностей, возникающих при расчете его компонентов.

Уравнение теплового баланса ВПС в предположении о вертикальной однородности температуры в нем имеет следующий вид:

$$T_t = -UT_x - VT_y - \frac{\left(T - T_{-H}\right)\cdot W_{-H}^{*}}{H} + \frac{Q_0 - Q_{-H}}{\rho_0 C_P H} + HED. \qquad (1)$$

Здесь ρ_0 и C_P – плотность и удельная теплоемкость морской воды при постоянном давлении; H и T – толщина и температура ВПС; U и V – средние в пределах ВПС зональная и меридиональная скорости течений; W^*_{-H} – вертикальная скорость течений, нормальная к топографии нижней границы ВПС, с учетом его горизонтальной неоднородности ($W^*_{-H} = W_{-H}+U_{-H}H_x+V_{-H}H_y$); T_x (H_x) и T_y (H_y) – зональный и меридиональный градиенты температуры (толщины) ВПС; U_{-H} и V_{-H} – зональная и меридиональная скорость течений у основания ВПС; T_t – локальное изменение температуры ВПС (частная производная температуры ВПС по времени); UT_x, VT_y, и $(T–T_{-H})\cdot W^*_{-H}/H$ – зональная, меридиональная и вертикальная адвекция тепла, соответственно; Q_0 и Q_{-H} – тепловые потоки на верхней и нижней границах ВПС; HED – горизонтальная вихревая диффузия тепла. Ось x направлена на восток, ось y – на север, а ось z – вертикально вверх. Начало системы координат находится на невозмущенной поверхности океана.

Поток тепла на нижней границе ВПС Q_{-H} зависит от скорости заглубления ВПС ($dH/dt = \partial H/\partial t + U_{-H}H_x + V_{-H}H_y$), скачка температуры ($T - T_{-H}$) и скорости вертикальных движений у его основания (W_{-H}) и оценивается из обобщенного на случай горизонтально-неоднородного океана соотношения Крауса – Тернера [Краус, 1979; Полонский, 1989]:

$$Q_{-H} = \begin{cases} \rho_0 C_P (T - T_{-H}) \cdot \left(\dfrac{dH}{dt} + W_{-H} \right) & при \quad \left(\dfrac{dH}{dt} + W_{-H} \right) < 0 \\ 0 \quad при \quad \left(\dfrac{dH}{dt} + W_{-H} \right) \geq 0 \end{cases}. \qquad (2)$$

Последнее слагаемое в правой части уравнения (1) имеет вид:

$$HED = \left(\left(1.5 \cdot 10^3 + K \right) \cdot \left(T_{xx} + T_{yy} \right) + K_x T_x + K_y T_y \right) + \frac{\left(K - k_{-H} \right)}{H} \cdot \left(T_x H_x + T_y H_y \right). \qquad (3)$$

Здесь $K = \dfrac{1}{H} \int_{-H}^{0} k dz$; ($T_{xx}$ + T_{yy}) – лапласиан температуры ВПС; K_x и K_y – зональный и меридиональный градиенты коэффициента горизонтальной вихревой диффузии тепла в ВПС; k_{-H} – значение этого коэффициента у основания ВПС.

Для параметризации коэффициента k используется зависимость: $k = v_D \cdot (v_x + u_y)^2$ [Wolff et al., 1997; Legutke, Maier-Reimer, 1999]. Здесь

ν_D = 5.5 × 10^{14} м^{2}с, а в скобках записана локальная скорость деформации. Значение коэффициента k рассчитывалось с использованием вертикальных профилей зональной u и меридиональной v скорости течений, доступных в используемых массивах данных ре-анализов. В результате получены вертикальные профили коэффициента k в каждом узле пространственной сетки.

Первое слагаемое в правой части уравнения (3) представляет собой горизонтальную вихревую диффузию тепла в пределах ВПС, а второе слагаемое описывает взаимодействие вертикального и горизонтального турбулентного обмена теплом. Это слагаемое возникает из-за учета переменного по вертикали коэффициента горизонтальной вихревой диффузии тепла. Для рассматриваемых пространственно-временных масштабов слагаемое $(K–k_{–H})\cdot(T_xH_x + T_yH_y)/H$ на большей части Северной Атлантики составляет менее 1% от величины горизонтальной вихревой диффузии тепла в пределах ВПС. Это соотношение в отдельных областях экваториальной зоны, интенсивных течений и моря Лабрадор может достигать 3 – 5%.

При анализе среднегодового баланса тепла ВПС возникает ряд дополнительных слагаемых, связанных с ковариациями флуктуаций параметров ВПС на сезонном масштабе. Оценка величины этих слагаемых показала, что существенная роль в тепловом балансе принадлежит ковариациям сезонных флуктуаций компонентов скорости течений и градиентов температуры ВПС.

Анализ погрешностей расчета различных слагаемых уравнения теплового баланса ВПС показал, что их типичная величина составляет порядка 10% величины основных компонентов баланса тепла. Исключение составляют отдельные области в высоких широтах, в которых в зимний период важны потоки тепла на нижней границе ВПС. Здесь типичная погрешность оценки величины $Q_{–H}$ может достигать 30 – 40% вследствие низкого пространственно-временного разрешения доступных данных.

Параграф 1.3 посвящен обсуждению современного состояния изученности сезонной изменчивости теплового баланса ВПС Северной Атлантики. Показано, что относительная важность составляющих баланса тепла ВПС на сезонном масштабе в разных регионах Северной Атлантики все еще остается предметом широкой дискуссии.

В **параграфе 1.4** приводится анализ сезонных изменений баланса тепла ВПС. Показано, что на сезонном масштабе вертикальная адвекция тепла в экваториальной зоне и горизонтальная адвекция тепла в области Гольфстрима сбалансированы горизонтальной вихревой диффузией тепла в течение всего года. Изменение температуры ВПС во внутренней части субтропического круговорота в январе обусловлено балансом частной производной температуры ВПС по времени и горизонтальной вихревой диффузии тепла, а в июле – вертикальной адвекции тепла и тепловыми потоками на верхней границе ВПС. Во внутренней части субполярного круговорота изменение температуры ВПС в январе определяется частной производной температуры ВПС, которая в равной степени сбалансирована тепловыми потоками на верхней и нижней границах ВПС и горизонтальной вихревой диффузией тепла. В июле здесь важны локальное изменение температуры и вертикальная адвекция тепла, которые сбалансированы поверхностными потоками тепла и горизонтальной вихревой диффузией тепла.

Анализ сезонных изменений зонально-осредненных компонентов баланса тепла ВПС в Северной Атлантике показал, что при таком масштабе пространственного осреднения частная производная температуры ВПС по времени в основном балансируется суммарными потоками тепла на поверхности океана. На наличие прямой связи между этими компонентами баланса тепла на всех широтах указывают высокие отрицательные значения коэффициентов корреляции. Исключение составляют регионы, расположенные севернее 65° с. ш., где важна меридиональная адвекция тепла, и экваториальная зона, включая окрестность Межпассатного противотечения между 3 – 10° с. ш., где важны вертикальная адвекция тепла и горизонтальная диффузия тепла.

Таким образом, сезонные изменения зонально-осредненных величин частной производной температуры ВПС по времени с достаточной степенью точности балансируются сезонными флуктуациями тепловых потоков на поверхности океана. При уменьшении пространственных масштабов осреднения начинают разрешаться такие циркуляционные особенности, как стрежни интенсивных течений, где важны адвективный теплоперенос и горизонтальная вихревая диффузия тепла, и области поднятия/опускания вод с большими величинами вертикальной адвекции тепла. Это приводит к нарушению простого

локального баланса между сезонными вариациями частной производной температуры ВПС и потоков тепла на границе раздела океана с атмосферой.

Глава 2 посвящена анализу компонентов баланса тепла, формирующих межгодовые изменения температуры ВПС Северной Атлантики. В **параграфе 2.1** обсуждаются особенности межгодовых изменений теплового баланса по литературным источникам. **Параграф 2.2** посвящен оценке величин составляющих теплового баланса и анализу их относительной роли в суммарном балансе тепла на межгодовом масштабе.

Показано, что среднегодовой баланс тепла в ВПС главным образом обусловлен балансом адвективного переноса тепла и горизонтальной вихревой диффузии тепла. Локальное изменение температуры ВПС и вклад тепловых потоков на нижней границе ВПС в баланс тепла верхнего слоя на этом временно́м масштабе незначительны. Вклад тепловых потоков на поверхности океана в межгодовую изменчивость температуры ВПС в целом по акватории существенно меньше 30%. Исключение составляют отдельные области, например, северо-западная часть Северного субтропического антициклонического круговорота (ССАК), где их вклад превышает 30 – 60%.

Параграф 2.3 посвящен анализу межгодовых изменений компонентов баланса тепла в разные сезоны. На значительной части акватории Северной Атлантики (за исключением области Северного субполярного циклонического круговорота (ССЦК)) межгодовые изменения температуры ВПС малы по сравнению с главными слагаемыми уравнения баланса тепла ВПС на протяжении большей части года. Основные слагаемые в этом уравнении на анализируемых масштабах связаны с нелокальными процессами – адвекцией тепла (горизонтальной и вертикальной) и горизонтальной вихревой диффузией тепла. Вариации тепловых потоков на поверхности океана важны вне зоны действия струйных течений в ССАК и ССЦК (а летом, в период ослабления циркуляции, и в окрестности интенсивных течений). В тропической зоне эти вариации не вносят существенного вклада в баланс тепла ВПС на протяжении большей части года. Потоки тепла на нижней границе ВПС важны на этих масштабах только в период развития интенсивной осенне-зимней конвекции на части акватории ССЦК и весной в окрестности Межпассатного противотечения.

Параграф 2.4 посвящен анализу роли горизонтальной вихревой диффузии тепла в среднегодовом балансе тепла ВПС.

В предыдущих параграфах проведен анализ величины компонентов баланса тепла ВПС для акватории Северной Атлантики по среднегодовым данным и по среднемесячным данным в разные сезоны. Получено, что важность горизонтальной вихревой диффузии тепла в тепловом балансе для рассматриваемых случаев имеет принципиальные различия, особенно во внутренней части субтропического круговорота. При оценке горизонтальной вихревой диффузии тепла по среднегодовым данным в уравнении теплового баланса вклад горизонтального вихревого переноса тепла в изменение температуры ВПС может существенно завышаться. Это в основном обусловлено наличием тесной взаимосвязи между сезонными флуктуациями компонентов вектора скорости течений и градиентов температуры ВПС в отдельных регионах Северной Атлантики (особенно в низких широтах) (рис. 1). Эта связь между компонентами вектора скорости течений и градиентами температуры на сезонном масштабе обусловлена синхронизацией крупномасштабных процессов в системе океан-атмосфера. В зимний период происходит обширное охлаждение и заглубление ВПС вместе с интенсификацией циркуляции ветров и течений в Северной Атлантике. В летний период, наоборот, отмечается существенный прогрев и уменьшение толщины ВПС, общее ослабление ветров и течений. Исключение составляет восточная часть Тропической Атлантики, которая характеризуется муссонным режимом циркуляции, что выражается в усилении ветров и течений в летний сезон у берегов Африки, приблизительно между 5 и 15° с. ш. Из-за знакопеременности сезонных вариаций зонального и меридионального компонентов вектора скорости течений и горизонтальных градиентов температуры ВПС коэффициенты корреляции между ними также знакопеременны. В тропической зоне (5 – 20° с. ш.) преобладают отрицательные корреляции, а в ССАК – положительные.

В центральной и восточной частях Северной Атлантики при оценке слагаемых среднегодового баланса тепла ВПС важны также погрешности, связанные с неточностью оценок среднегодовых потоков тепла на поверхности океана.

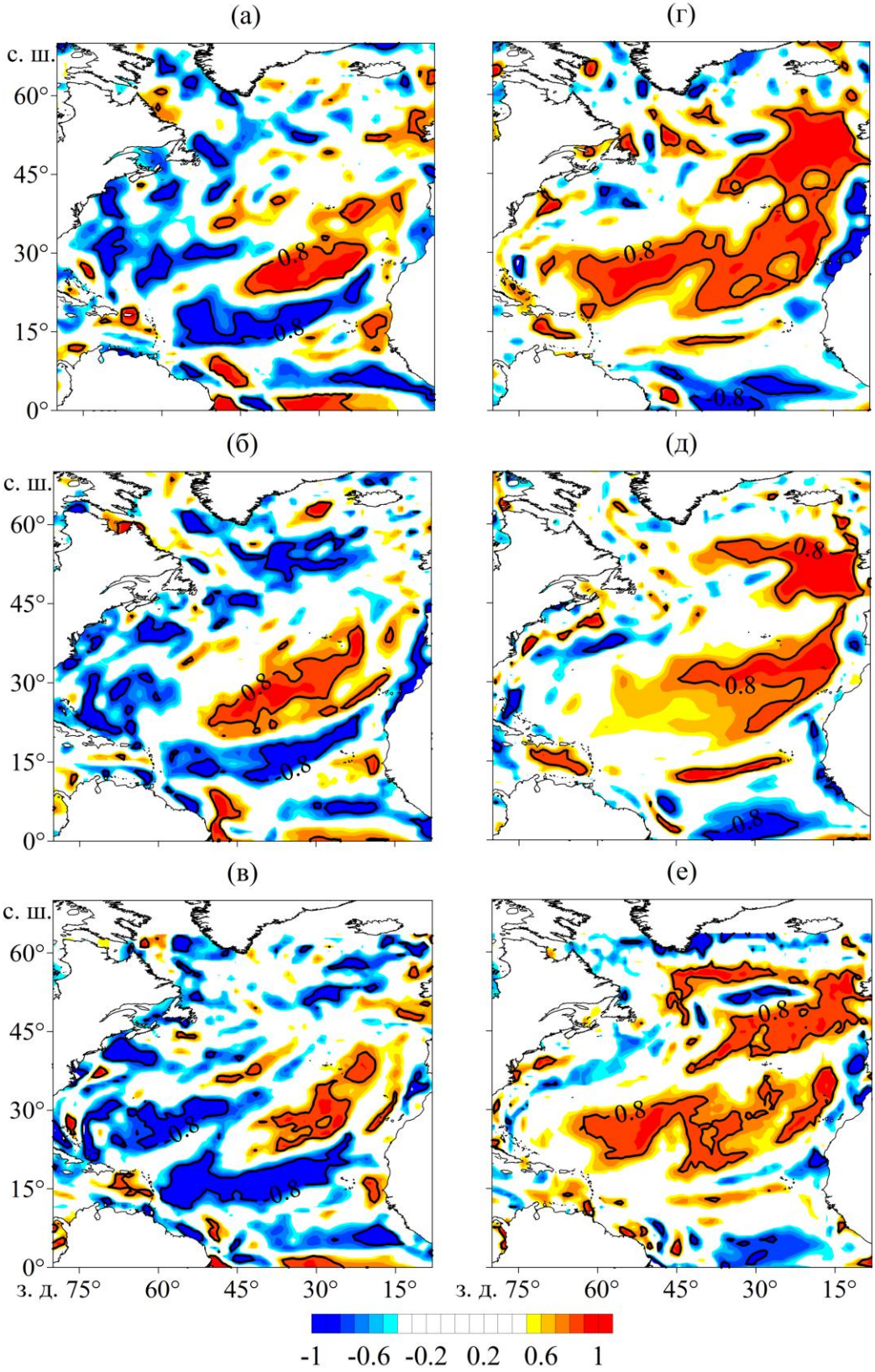

Рисунок 1 – Пространственные распределения величин коэффициентов корреляции между сезонными флуктуациями скорости зональных течений U' и зональных градиентов температуры ВПС T'_x (а, б, в) и скорости меридиональных течений V' и меридиональных градиентов температуры ВПС T'_y (г, д, е) в Северной Атлантике по данным ORA-S3 (а, г), GFDL (б, д) и GODAS (в, е). Показаны изолинии ± 0.8.

Максимальный вклад горизонтальной вихревой диффузии тепла в межгодовую изменчивость температуры ВПС отмечается в северо-западной части Северной Атлантики и в области ССЦК. Это связано с большей неустойчивостью системы течений, приводящей к формированию интенсивных вихрей в этой области Атлантического океана.

В **Главе 3** рассматриваются особенности формирования межгодовых изменений адвективного переноса тепла в ВПС Северной Атлантики. В **параграфе 3.1** обсуждаются опубликованные результаты изучения формирования термических аномалий адвективного происхождения. Анализ количественных оценок вклада различных факторов, формирующих межгодовые колебания как среднегодовых величин горизонтальной адвекции тепла, так и величин в зимний и летний сезоны приведен в **параграфах 3.2** и **3.3**. Разделение адвективного переноса тепла на средние величины и аномалии проводилось по следующей методике. Пусть горизонтальные градиенты температуры и компоненты вектора скорости течений представляют собой сумму средней климатической величины, полученной по среднегодовым полям и отдельно для января и июля (¯) и текущих межгодовых отклонений (') от неё:

$$U = \overline{U} + U', \quad V = \overline{V} + V', \quad T_x = \overline{T}_x + T'_x, \quad T_y = \overline{T}_y + T'_y. \tag{4}$$

Тогда зональная и меридиональная адвекции тепла в ВПС имеют вид:

$$UT_x = \left(\overline{U} + U'\right)\cdot\left(\overline{T}_x + T'_x\right) = \overline{U}\,\overline{T}_x + \overline{U}T'_x + U'\overline{T}_x + U'T'_x, \tag{5}$$

$$VT_y = \left(\overline{V} + V'\right)\cdot\left(\overline{T}_y + T'_y\right) = \overline{V}\,\overline{T}_y + \overline{V}T'_y + V'\overline{T}_y + V'T'_y. \tag{6}$$

Из уравнений (5) и (6) следует, что аномалии зональной и меридиональной адвекции тепла определяются суперпозицией следующих механизмов, ответственных за формирование аномалий температуры воды: переносом аномальных градиентов температуры средним течением; переносом климатических градиентов температуры аномальными течениями; переносом аномалий градиента температуры аномальными течениями.

Анализ отдельных компонентов аномальной горизонтальной адвекции тепла в ВПС в интенсивных течениях показал следующее. В области Гольфстрима (после его отрыва от континентального склона) аномалии горизонтальной адвекции тепла в ВПС обусловлены в основном колебаниями интенсивности

течения, а в Гвианском течении и области Гольфстрима (до его отрыва) – вариациями горизонтальных температурных градиентов в ВПС. В Лабрадорском течении оба этих составляющих одного знака и близки по абсолютной величине. В Восточно-Гренландском течении они компенсируют друг друга.

Вклад аномалий горизонтальных градиентов температуры, переносимых аномальными течениями, в формирование аномалий адвективного переноса тепла в ВПС Северной Атлантики в целом по акватории невелик. Исключение составляет область Североатлантического и Западно-Гренландского течений.

Глава 4 посвящена анализу взаимосвязи САК и межгодовой изменчивости компонентов теплового баланса ВПС Северной Атлантики. В **параграфе 4.1** обсуждается состояние изученности рассматриваемого вопроса.

Роль компонентов теплового баланса в формировании трипольной структуры аномалий температуры ВПС Северной Атлантики рассматривается в **параграфе 4.2**. Показано, что при интенсификации САК отрицательная аномалия температуры ВПС в западной части тропической зоны в основном обусловлена аномалиями горизонтальной адвекции и вихревой диффузии тепла, а также аномальными потоками тепла на поверхности океана (хотя и с меньшим уровнем значимости). Противофазные изменения температуры ВПС в восточной части тропической зоны и западной части субтропической зоны сопровождаются аномалиями компонентов теплового баланса противоположного знака. В субполярной зоне аномалии нелокальных компонентов баланса тепла также вносят существенный вклад в синфазное с тропиками изменение температуры ВПС. В областях глубокой конвекции в высоких широтах важны и аномальные потоки тепла на нижней границе ВПС, а в восточной части субполярного круговорота – аномалии суммарных потоков тепла на поверхности океана.

В **параграфе 4.3** проанализированы межгодовые вариации компонентов баланса тепла и САК. Показано, что периодичность в диапазоне 6 – 8 лет выделяется на значимом уровне для всех основных компонентов теплового баланса ВПС Северной Атлантики и в индексе САК.

Анализ функций взаимной корреляции между компонентами баланса тепла в западной части Северной Атлантики и индексом САК в зимний период,

проведенный в **параграфе 4.4**, выявил асинхронную связь между большинством составляющих баланса тепла ВПС и индексом САК.

В **параграфе 4.5** приводится блок-схема взаимных изменений САК и компонентов баланса тепла ВПС Северной Атлантики (рис. 2).

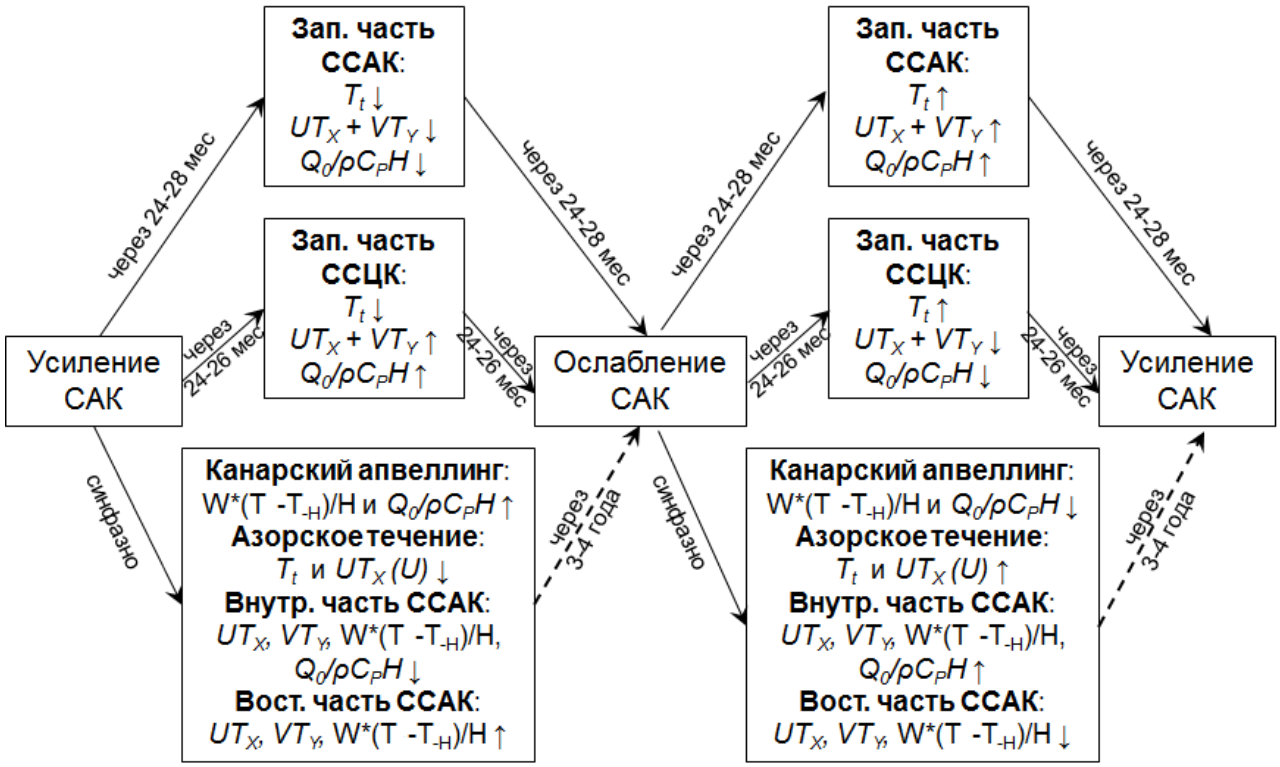

Рисунок 2 – Блок-схема взаимных изменений индекса САК и компонентов теплового баланса ВПС Северной Атлантики. Сплошные стрелки получены для зимнего сезона и характеризуют связи статистически значимые на 99% уровне доверия. Пунктирные стрелки характеризуют связь, значимую на 90% уровне по [Джиганшин, Полонский, 2003]. Вертикальные стрелки, направленные вверх (вниз), обозначают увеличение (уменьшение) компонента теплового баланса ВПС по абсолютной величине.

Согласно этой схеме, усиление САК соответствует синфазной интенсификации северо-восточного пассата и Канарского апвеллинга. В восточной части Тропической Атлантики сформируется отрицательная аномалия температуры ВПС. При высоких индексах САК происходит также усиленный вынос холодных вод в Северную Атлантику из Арктики. Через 24 – 28 месяцев происходит формирование аномалий компонентов баланса тепла и характеристик ВПС в западных частях ССАК и ССЦК. В дальнейшем, адвективные и диффузионные процессы в ВПС океана приводят к формированию аномалий

характеристик ВПС в районе центров действия атмосферы, которые влияют на теплообмен океана с атмосферой, циркуляционные атмосферные параметры и переключают фазу САК на противоположную. Таким образом, согласно приведенной схеме полный цикл взаимодействия ВПС с САК составляет около 8 лет с учетом времени адвекции аномалий. Полученный результат согласуется с наличием значимого пика на близких периодичностях в спектре индекса САК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе с использованием данных ре-анализов атмосферы и океана и атмосферных характеристик на основании расчета всех слагаемых замкнутого уравнения теплового баланса ВПС горизонтально-неоднородного океана установлены основные закономерности формирования межгодовой изменчивости характеристик ВПС в Северной Атлантике. Проанализирована относительная роль различных компонентов теплового баланса в формировании межгодовых вариаций как среднегодовой температуры ВПС, так и температуры ВПС в разные сезоны. Оценены вклады различных слагаемых, описывающих аномалии адвективного переноса тепла, в суммарные аномалии горизонтальной адвекции тепла в ВПС Северной Атлантики на межгодовом масштабе. Выявлена взаимосвязь межгодовой изменчивости характеристик ВПС Северной Атлантики с САК.

Основные научные результаты диссертационной работы:

1. Выявлено, что на значительной части акватории Северной Атлантики между компонентами вектора скорости течений и градиентами температуры ВПС существует тесная взаимосвязь на сезонном масштабе. Взаимодействие сезонных флуктуаций полей этих характеристик обусловливает до 50% изменчивости среднегодовой температуры ВПС в центральной части Тропической Атлантики.
2. Подтверждено, что межгодовые вариации составляющих баланса тепла ВПС характеризуются выраженными региональными особенностями во все сезоны. В тропических и субтропических широтах баланс тепла квазистационарен и определяется нелокальными процессами – адвекцией тепла и горизонтальной вихревой диффузией тепла. В субполярных широтах важны также частная

производная температуры ВПС по времени (весной) и потоки тепла на границах ВПС (в осенне-зимний период). В окрестности струйных течений типа Гольфстрима важная роль в межгодовой изменчивости температуры ВПС во все сезоны принадлежит флуктуациям горизонтальной адвекции тепла.

3. Установлен характер сезонной изменчивости межгодовых флуктуаций всех компонентов баланса тепла ВПС Северной Атлантики. Межгодовые колебания частной производной температуры ВПС по времени характеризуются наибольшей изменчивостью весной, а наименьшей – осенью. Наибольший вклад флуктуаций горизонтальной адвекции тепла в изменение температуры ВПС на межгодовом масштабе отмечается в зимний сезон, а наименьший – летом. Вклад межгодовых вариаций тепловых потоков на верхней границе ВПС, нормированных на толщину ВПС, в изменчивость температуры ВПС максимален летом и минимален осенью. Флуктуации тепловых потоков на нижней границе ВПС, нормированных на толщину ВПС, в целом по акватории не оказывают значительного влияния на межгодовые изменения температуры ВПС. Исключение составляют район формирования Североатлантической глубинной водной массы в осенне-зимний период и окрестность Межпассатного противотечения в весенне-летний период, где потоки тепла на нижней границе ВПС определяют более 35% и около 25% межгодовой изменчивости температуры ВПС, соответственно.

4. Получены вклады различных физических механизмов в общий адвективный теплоперенос в ВПС на межгодовом масштабе для всех основных течений Северной Атлантики и различных сезонов. Показано, что более 75% межгодовой изменчивости горизонтальной адвекции тепла в ВПС в области Гольфстрима (после его отрыва от континентального склона) обусловлено изменениями интенсивности течения, а в Гвианском течении и области Гольфстрима (до его отрыва) – вариациями горизонтальных температурных градиентов. В Лабрадорском течении оба этих компонента одного знака и примерно одинаковы по абсолютной величине. В Восточно-Гренландском течении они компенсируют друг друга. Вклад аномалий горизонтальных градиентов температуры, переносимых аномальными течениями, в формирование межгодовой изменчивости адвективного переноса тепла в ВПС Северной Атлантики в целом по акватории невелик. Исключение составляют области Западно-Гренландского и

Североатлантического течений, в которых эта составляющая адвективного переноса тепла определяет около 80% межгодовой изменчивости горизонтальной адвекции тепла.

5. Развит механизм поддержания САК, связанный с взаимодействием ВПС Северной Атлантики и приводного слоя атмосферы на межгодовом масштабе. Установлено, что полный цикл взаимодействия САК с аномалиями характеристик ВПС с учетом времени их адвективного переноса составляет около 8 лет. Аномалии характеристик ВПС, сформированные межгодовыми вариациями САК в центральной и восточной частях Северной Атлантики, эволюционируют под влиянием адвективных и диффузионных процессов. Этот механизм способствует распространению океанического сигнала к центрам действия атмосферы. Аномалии характеристик ВПС сопровождаются аномалиями теплообмена океана с атмосферой, особенно выраженными в районе этих центров, а также в окрестности интенсивных течений, и вызывают смену фазы САК на противоположную. Подтверждается, что изменчивость САК на масштабе около 8 лет представляет собой связанные колебания в североатлантической системе океан-атмосфера. Полученные результаты позволяют прогнозировать смену фазы САК с заблаговременностью 2 года.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из списка, рекомендованного ВАК России:

1. Полонский А.Б., **Сухонос П.А.** Внутригодовые изменения бюджета тепла верхнего квазиоднородного слоя в Северной Атлантике // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2016. – № 1. – С. 11–27.

2. Полонский А.Б., **Сухонос П.А.** Оценка составляющих теплового баланса верхнего квазиоднородного слоя в Северной Атлантике // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 52. – № 6. – С. 729–739.

3. Полонский А.Б., **Сухонос П.А.** Межгодовые изменения компонентов бюджета тепла верхнего слоя Северной Атлантики в разные сезоны // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 53. – № 4. – С. 523–531.

4. Полонский А.Б., **Сухонос П.А.** О вкладе вихревого переноса в среднегодовой бюджет тепла верхнего слоя Северной Атлантики // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 54. – № 5. – С. 597–606.

5. Полонский А.Б., **Сухонос П.А.** Североатлантическое колебание и бюджет тепла верхнего слоя Северной Атлантики // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – № 4. – С. 67–100.

6. Полонский А.Б., **Сухонос П.А.** О влиянии североатлантического колебания на тепловой баланс верхнего слоя Северной Атлантики // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 9. – С. 27–36.

Статьи, входящие в наукометрические базы Web of Science и Scopus:

1. Polonsky A.B., **Sukhonos P.A.** Variability of the wind stress, the field of currents, wind stress curl and vorticity of surface currents in the North Atlantic // Izvestiya Rossiiskaya Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya. – 2017. – № 1. – P. 62–73.

2. Polonsky A.B., **Sukhonos P.A.** Mechanism for the formation of temperature anomalies in the upper layer of the North Atlantic // Oceanology. – 2018. – V. 58. – № 5. – P. 652–660. https://doi.org/10.1134/S0001437018050120

3. Polonsky A.B., **Sukhonos P.A.** Mechanisms accounting for interannual variability of advective heat transport in the North Atlantic upper layer // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. – 2018. – P. 62–70. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77788-7_8

4. Polonsky A.B., **Sukhonos P.A.** The role of nonlocal processes in upper layer heat budget in the North Atlantic // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – № 272. – P. 022169. https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022169

5. Polonsky A.B., **Sukhonos P.A.** The role of wind forcing in the interannual variability of upper layer heat balance components in the North Atlantic // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. – 2019. – P. 51–62. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11533-3_6

Статьи, опубликованные в других изданиях, в том числе рекомендованных ВАК Украины:

1. Полонский А.Б., Шокурова И.Г., **Сухонос П.А.** Изменчивость завихренности напряжения трения ветра над Северной Атлантикой // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2013. – Вып. 27. – С. 200–204.
2. Шокурова И.Г., **Сухонос П.А.** Ситуации с экстремальными значениями завихренности касательного напряжения трения ветра в субтропической Атлантике зимой // Системы контроля окружающей среды. – 2014. – Вып. 20. – С. 140–144.
3. Крашенинникова С.Б., **Сухонос П.А.** Термические характеристики субтропической Атлантики по данным WODB и ORA-S3 // Системы контроля окружающей среды. – 2014. – Вып. 20. – С. 123–127.
4. Крашенинникова С.Б., **Сухонос П.А.** Сравнение температуры поверхности океана в северо-западной части северного субтропического антициклонического круговорота по данным WODB и ORA-S3 // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 3(12). – Часть 8. – С. 114–118.
5. Полонский А.Б., Шокурова И.Г., **Сухонос П.А.** Сезонная изменчивость завихренности напряжения трения ветра и завихренности поверхностных течений в Северной Атлантике // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 2. – С. 43–56.
6. Полонский А.Б., **Сухонос П.А.** Сравнительный анализ изменчивости температуры и толщины верхнего перемешанного слоя океана в Северной Атлантике по данным океанических ре-анализов ORA-S3 и GFDL // Системы контроля окружающей среды. – 2016. – Вып. 5(25). – С. 78–83.
7. Полонский А.Б., **Сухонос П.А.** Влияние сезонных вариаций полей течений и температуры на адвективный перенос тепла в верхнем слое Северной Атлантики // Системы контроля окружающей среды. – 2017. – Вып. 8(28). – С. 86–92.

Иные публикации: по теме диссертации опубликовано 24 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях.