

ОКЕАНИЧЕСКИЙ ФАКТОР МУЛЬТИДЕКАДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ МОНИТОРИНГА

**Бышев В.И., Серых И.В., Сидорова А.Н.,
Скляров В.Е., Анисимов М.В.**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, Москва, Нахимовский проспект, д.36, e-mail: labbyshev@ocean.ru
Статья поступила в редакцию 07.09.2018, одобрена к печати 01.10.2018*

Мультидекадная изменчивость современного климата (колебания 50–70 лет) – одна из наиболее актуальных текущих проблем в науках о Земле. Собственно колебание состоит из двух фаз, каждая из которых составляет 25–35 лет: фазы, когда верхний деятельный слой (ВДС) Мирового океана, отдавая явное и скрытое тепло в атмосферу, совершает своеобразную его тепловую разгрузку, а также фазы более континентального климата, когда ВДС океана аккумулирует тепло, стремясь восстановить свое начальное состояние. Есть основание полагать, что рассматриваемая изменчивость отражает внутреннюю динамику климатической системы океан–атмосфера–континент. Присутствие планетарных структур в атмосфере ГАО (глобальной атмосферной осцилляции) и в океане МОСТОК (мультидекадной осцилляции теплосодержания океана) позволяет понять воспроизведение наблюдаемой ритмики климатической системы. Наиболее чувствительными для климатической системы являются смены фаз климата, в результате которых в ней происходят как бы внезапные качественные сдвиги, сопровождаемые определенной перестройкой общей циркуляции океана и атмосферы. Так в океане при смене фазы климата либо интенсифицируется глубокая конвекция (при тепловой разгрузке ВДС океана), либо она ослабевает, а возможно и прекращается (при аккумуляции тепла ВДС). В атмосфере смены фаз климата отражаются на муссонной циркуляции: более континентальной фазе климата соответствует усиление муссонной циркуляции со всеми сопровождающими этот процесс особенностями. Прогноз смен фаз климата приобретает в связи с этим важное значение для экономической, социальной и политической жизни общества. В свою очередь качество прогноза связано с пониманием природы наблюдаемой изменчивости и представлением механизма этого явления. В работе для отдельных районов Мирового океана сопоставлены эволюция термической структуры ВДС с динамикой стерической моды колебаний уровня, определенной по спутниковым альтиметрическим наблюдениям. Установлено, что повышение уровня океана между временными фазами 1993–1999 гг. и 2000–2015 гг. составило 4–6 см и соответствовало тому росту уровня, который должен был бы произойти при наблюдаемых увеличениях теплосодержания ВДС океана. Сделан вывод о том, что на междекадных временных масштабах наряду с данными температуры поверхности океана (ТПО) в перспективе могут быть использованы альтиметрические спутниковые наблюдения для выявления региональных источников и стоков тепла в океане.

Ключевые слова: океан, современный климат, глубокая конвекция, аномалии, температура, климатическая изменчивость, сценарий климата, стерический уровень, мультидекадная изменчивость

Введение

Мировой океан является самым значительным аккумулятором и источником тепла в климатической системе, которая в современную эпоху в приповерхностном слое (IPCC, 2013) характеризуется положительным трендом глобальной температуры воздуха. На фоне наблюдаемого тренда идентифицируются значительные мультидекадные осцилляции как в океанологических, так и в метеорологических полях (Chu, 2011; Анисимов и др., 2012; de Viron et al., 2013; Steinman et al., 2015).

В результате исследований была установлена неоднозначность существующего представления о наличии непрерывного положительного внутривекового тренда теплосодержания Мирового океана (Бышев и др., 2009; Levitus et al., 2009; Liman et al., 2010). В период современного потепления на континентах в 1975–1999 гг. в Атлантическом и Тихом океанах, напротив, были обнаружены области, в которых в это же время происходило выхолаживание вод. В середине 70-х гг. XX (Minobe, 1997; Tsonis et al., 2007) и в начале XXI столетий (Lee, McPhaden, 2008; Бышев и др., 2011; Пономарев и др., 2018) наблюдались климатические сдвиги (shifts), при которых менялись знаки тенденций изменения приповерхностной температуры, атмосферного давления на уровне моря, осадков, влажности, облачности и других характеристик над океанами и континентами.

В указанный выше период в Тихом и Атлантическом океанах, где наблюдалось выхолаживание ВДС, были проведены крупномасштабные гидрофизические эксперименты МЕГАПОЛИГОН и АТЛАНТЕКС-90 (Бышев, 2003), которые позволили выявить аномально высокие потоки явного и скрытого тепла из океана в атмосферу, засвидетельствовав тем самым интенсивную тепловую разгрузку в ряде энергоактивных зон Мирового океана, происходившую в последней четверти XX столетия (Бышев, Снопков, 1990; Бышев и др. 1993). Обнаружение климатических сдвигов (рис. 1), произошедших в середине 1970-х годов и на рубеже XX и XXI веков в Тихоокеанско-Американском (Bond et al., 2003), Северо-Атлантическом (Бышев и др., 2011) и в Тихоокеанско-Индooкеанском (Пономарев и др., 2018) регионах явилось одним из важных результатов изучения мультидекадной изменчивости динамики глобальной климатической системы. Цель данной работы сводится к поиску однозначных признаков мультидекадных климатических процессов, влиянию которых в той или иной мере подвержены все континенты и морские акватории нашей планеты. В качестве наиболее показательного фактора следует считать потоки прямого и скрытого тепла в системе взаимодействия океана и атмосферы. В рамках концепции короткопериодной климатической изменчивости, основанной на результатах численного моделирования (Анисимов и др., 2012; Byshev et al., 2017), анализа полувекового массива гидрологических измерений (Бышев, Фигуркин, Анисимов, 2017) и материалов крупномасштабных гидрофизических экспериментов (МЕГАПОЛИГОН и АТЛАНТЕКС-90) было высказано предположение, что тепло, дающее начальный импульс для возникновения на мультидекадном временном масштабе фазового перехода между двумя последовательными сценариями климата на кон-

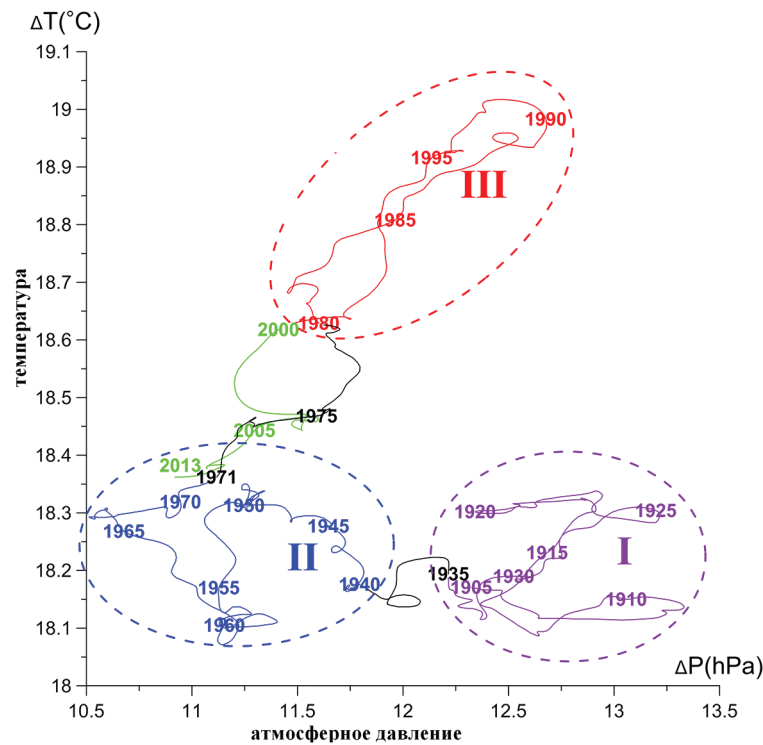


Рис. 1. Фазовая траектория термобарического параметра состояния Северо-Атлантического колебания (разными цветами выделены фазовые подмножества, соответствующие различным сценариям климата): I) 1905–1935 гг., II) 1940–1971 гг., III) 1980–1999 гг. ΔP и ΔT – разности атмосферного давления на уровне моря и приповерхностной температуры между Азорским и Исландским центрами действия атмосферы (Бышев и др. 2011).

тинентах, априори переходит в атмосферу из океана в процессе его наблюдаемой тепловой разгрузки. При таком подходе контроль над состоянием теплосодержания ВДС океана представляет возможность отслеживания и прогнозирования эволюции современной климатической ситуации в гидросфере и атмосфере планеты. Оперативность и надежность этого контроля, по-видимому, можно существенно повысить путем использования спутниковых технологий наблюдения Земли из космоса. Признаки наличия климатического источника тепла в океане могут быть идентифицированы, например, по наблюдаемым междекадным отрицательным аномалиям ТПО, формирующимся при тепловой разгрузке (Бышев и др., 2009). Однако, если тепло из океана в атмосферу поступает не из поверхностного, а из теплого промежуточного слоя, то на поверхности океана, напротив, могут обнаруживаться слабые положительные аномалии ТПО, экранирующие тем самым тепловую разгрузку океана. В очагах выхолаживания (прогрева) ВДС океана на мультидекадных временных масштабах следует ожидать сжатия (расширения) его вод и понижения (повышения) его уровня (Gill, Niiler, 1973). Мониторинг температуры поверхности и уровня океана, которые, как правило, взаимно дополняют друг друга, может способствовать обнаружению локальных океанических источников и стоков тепла. В связи с этим привлечение материалов альтиметрических наблюдений за уровнем

Мирового океана, в спектре изменчивости которого содержится стерическая мода, связанная с изменением теплового состояния океанической водной массы ВДС, является перспективным. Основы теории изменчивости стерического уровня океана рассмотрены в работе (Gill, Niiler, 1973). Мультидекадные изменения уровня Мирового океана и внутренних морей с различной степенью детализации рассмотрены, например, в работах (Фукс, 2005; Lee, McPhaden, 2008; Белоненко и др., 2009; Chen et al., 2017; Зверева, 2017).

Методика исследования

Термические характеристики ВДС в Мировом океане для периода 1948–2007 гг. были рассмотрены на основе численных расчетов по модели Института Вычислительной математики РАН (Мошонкин и др., 2004; Гусев, Дианский, 2014) с пространственным разрешением 0.5° широты \times 1° долготы. Временное разрешение при этом составило 1 час. Для отдельных районов Атлантического, Тихого и Южного океанов были детально исследованы эволюция термической структуры, вертикальные распределения потенциальной температуры, солёности и плотности (Byshev et al., 2017).

Отметим, что при численном моделировании в качестве граничных условий на поверхности океана задавались потоки тепла, солёности и импульса, источником которых служили данные CORE (Large, Yager, 2004). Диагноз мультидекадной изменчивости теплосодержания ВДС океана был выполнен в отдельных тестовых районах Атлантического ($55\text{--}75^\circ\text{с.ш.}$, 55°з.д. – 40°в.д.), Тихого ($30\text{--}50^\circ\text{с.ш.}$, 150°в.д. – 140°з.д.) и Южного океанов ($55\text{--}50^\circ\text{ю.ш.}$, $145\text{--}150^\circ\text{в.д.}$). Согласно (Бышев и др., 2009) выбранные районы в Атлантическом и Тихом океанах характеризовались в период 1975–1999 гг. формированием крупномасштабных отрицательных аномалий ТПО. Контроль результатов численного моделирования осуществлялся путем их сопоставления с материалами таких гидрофизических экспериментов в океане как ПОЛИГОН-70, ПОЛИМОДЕ, МЕГАПОЛИГОН и АТЛАНТЕКС-90 (Бышев, 2003). Принималось во внимание то, что на мультидекадном временном масштабе выбранные нами тестовые районы должны отличаться повышенным циклогенезом в планетарной атмосфере (рис. 2) в соответствии с термобарической структурой обнаруженной ранее Глобальной атмосферной осцилляции (Бышев и др., 2012).

Для проверки связи колебаний стерического уровня океана с изменением теплосодержания его ВДС использовалась база спутниковых альтиметрических данных Университета в Колорадо (США), которая была доступна на сайте www.sealevel.colorado.edu. В базе содержались результаты измерений уровня за период с 1993 г. по 2016 г. Эти наблюдения были подвергнуты пространственно-временному осреднению для исключения короткопериодной, включая сезонную, изменчивости высоты уровенной поверхности океана. Полученные результаты были затем положены в основу оценки колебаний стерического уровня в пределах двух наблюдавшихся фрагментов последовательных фаз климата (рис. 1): в конце XX

(1993–1999 гг.) и в начале XXI (2000–2016 гг.) столетий. Авторы использовали методические подходы и принимали во внимание оценки точности спутниковых наблюдений уровня (2 см) для открытого океана (Фукс, 2005; Lee, McPhaden, 2008; Троицкая и др., 2012; Зверева, 2017; Mao et al., 2017).

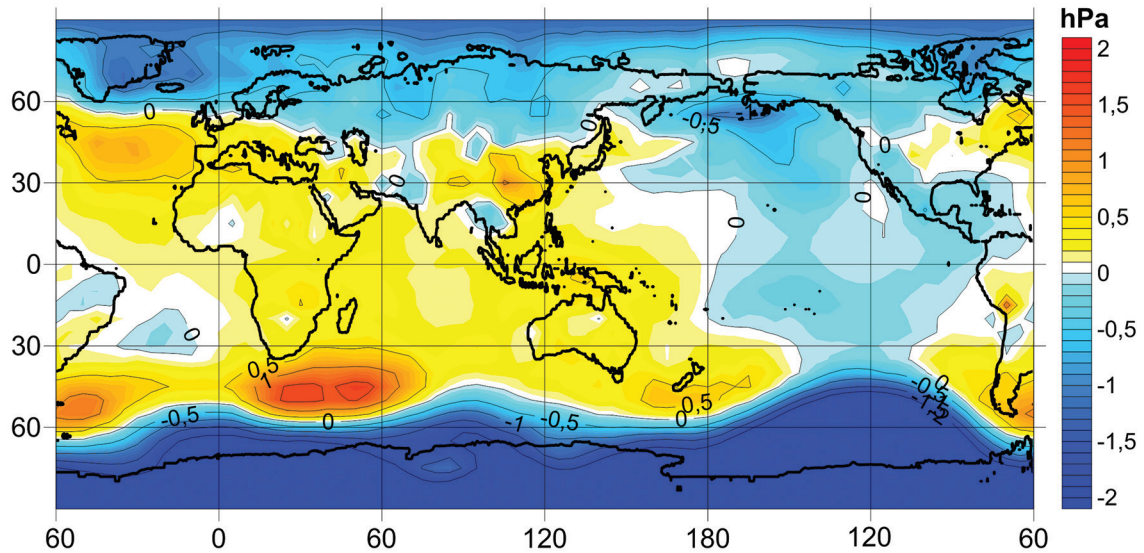


Рис. 2. Климатические изменения глобального поля атмосферного давления на уровне моря между периодами II и III: 1980–1999 гг. и II: 1940–1970 гг.

Оценки соответствующих изменений стерического уровня ΔH при тепловой разгрузке океана в 1975–1999 гг. в Атлантическом и Тихом океанах были произведены нами по формуле:

$$\Delta H(\phi, \lambda, t) = \sum_1^n C(T_n, P_n) \Delta T(\phi, \lambda, n, t) H_n,$$

где ϕ, λ – координаты (широта, долгота), t – время, C – коэффициент термического расширения, зависящий от температуры T , давления P и солёности S , однако от последней в значительно меньшей степени по сравнению с температурой и давлением, n – количество принятых в обработку слоев.

Расчеты показали, что изменение теплосодержания ВДС в 1975–1999 гг. сопровождалось изменением стерического уровня на 6 см как в Атлантике, так и в Тихом океане.

Дискуссия

Выявлено, что мультидекадная фазовая изменчивость климата (Бышев и др., 2011) характеризовалась вариациями теплосодержания ВДС океана (Анисимов и др., 2012; Byshev et al., 2017). Результаты численного моделирования (Byshev et al., 2017) и анализ данных наблюдений (Бышев, Фигуркин, Анисимов, 2017) показали, что до середины 70-х годов в тестовых районах Мирового океана теплосодержание

ВДС было относительно высоким. Очевидно, что до середины 70-х гг. ВДС океана в рассматриваемых нами районах (рис. 3) аккумулировал тепло, поступавшее, по всей вероятности, из атмосферы. Далее, в период с середины 70-х и до конца 90-х гг., в этих же районах имело место заметное сокращение теплосодержания ВДС. В начале XXI века температура воды в слое вновь стала повышаться. Характер мультидекадной эволюции теплосодержания ВДС находился в прямой зависимости от соответствующих изменений мощности слоя, которая, в свою очередь, определялась глубиной проникновения плотностной конвекции. Указанная особенность планетарного термодинамического режима ВДС, о которой идет речь (рис. 3), была квалифицирована нами как Междекадная Осцилляция Теплосодержания Океана – МОСТОК (Vyshev et al., 2017).

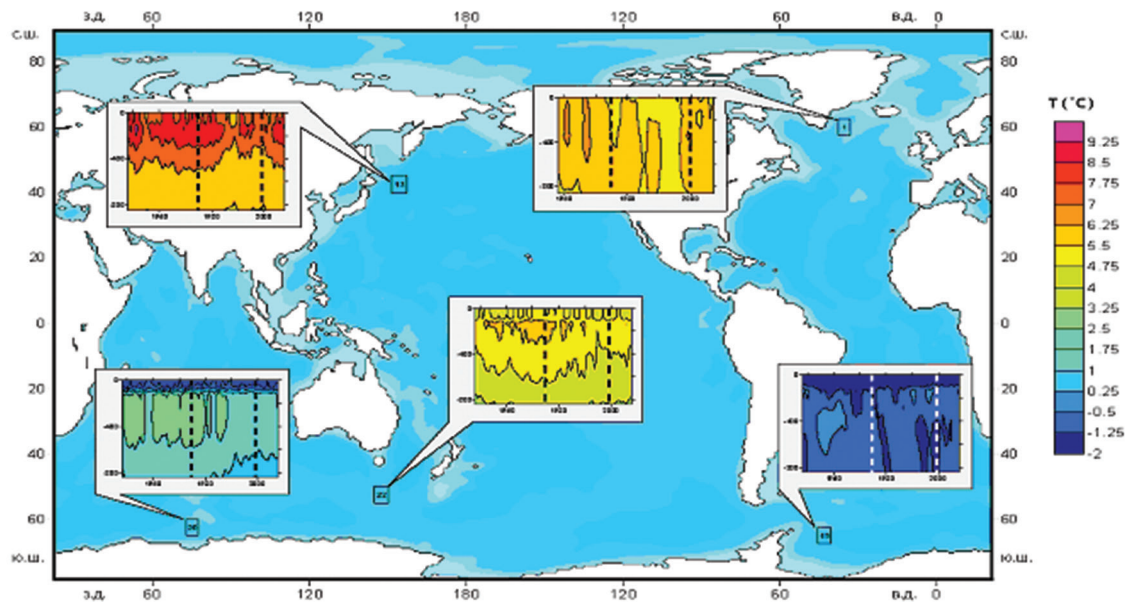


Рис. 3. Схема расположения информативных районов Мирового океана, для которых проведено моделирование эволюции (1950–2015 гг.) термической структуры ВДС, результаты которого показаны на врезках.

Тестовый район Северной Атлантики примечателен возникновением условий, благоприятствующих формированию холодных поверхностных вод повышенной плотности (рис. 4). Здесь в ходе эволюции полей температуры и условной плотности с середины 70-х и до конца 90-х гг. была интенсифицирована глубокая конвекция: океан в это время отдавал тепло атмосфере. До и после этого периода глубокая конвекция в этом районе была заметно ослаблена. За глубокую нами принимается конвекция, мощность которой значительно (на сотни метров) превышает сезонную. Процесс глубокой конвекции приурочен к районам Мирового океана, характеризующихся способностью фазовой аккумуляции и разгрузки тепла на междекадных временных масштабах.

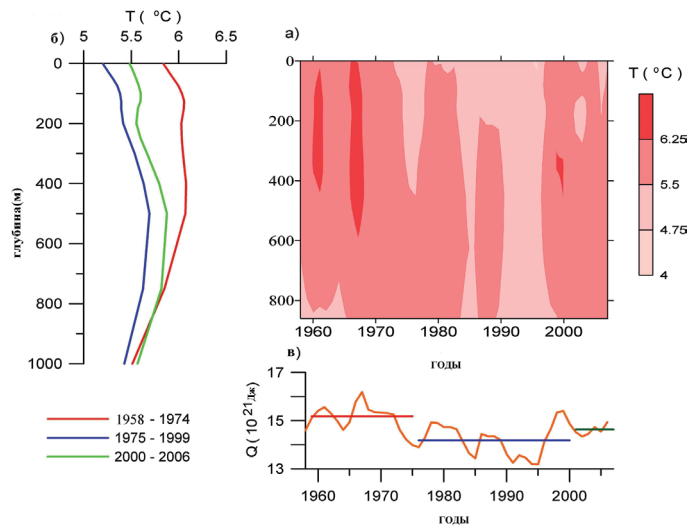


Рис. 4. Эволюция термической структуры ВДС в Северной Атлантике (55–65°с.ш., 40–30°з.д.) в холодную половину года в период 1958–2006 гг. (Byshev et al., 2017): (а) изоплеты температуры в центре тестового района, (б) вертикальное распределение средней для района температуры по трем фазам климата, (с) изменение теплосодержания верхнего 800-метрового слоя (горизонтальные линии соответствуют значениям средней величины теплосодержания ВДС в пределах трех фаз климата).

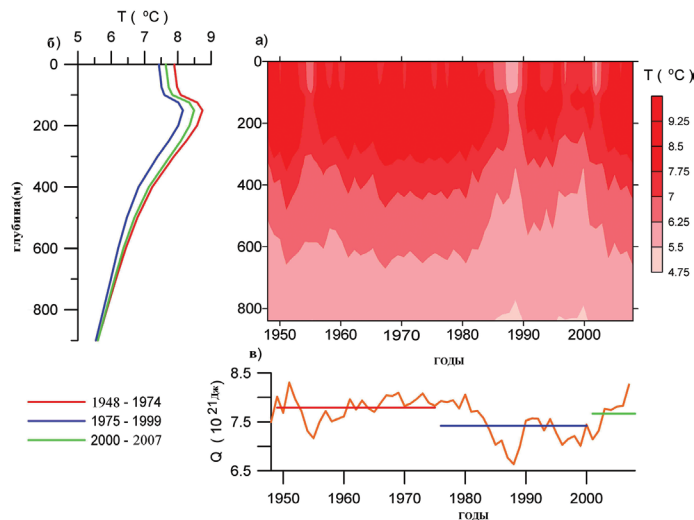


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для термической структуры ВДС в Тихом океане (40–45°с.ш., 152–157° в.д.) в холодную половину года в период 1948–2007 гг.

Для центральной части Тихого (рис. 5) и Южного (рис. 6) океанов были получены результаты, подобные результатам для Северной Атлантики. До середины 70-х гг. ВДС в этих регионах также прогревался, затем происходило его выхолаживание, продолжавшееся до начала XXI столетия, после чего вновь имело место повышение температуры вод слоя. Подобный фазовый характер мультидекадной эволюции термической структуры океана присущ каждому без исключения принятому в обработку тестовому полигону. На рис. 4–6 показаны средние за отдельные

фазы климата вертикальные распределения температуры и значения теплосодержания ВДС в выбранных районах Тихого, Атлантического и Южного океанов.

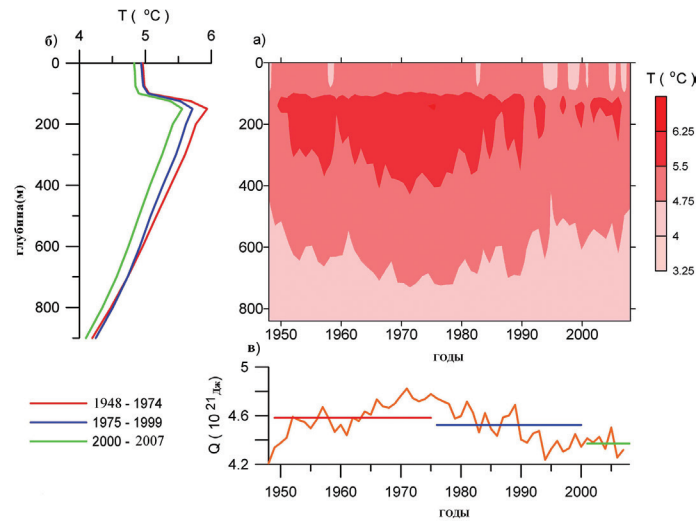


Рис. 6. То же, что и на рис. 4, но для термической структуры ВДС в Южном океане ($55\text{--}50^{\circ}$ ю.ш., $145\text{--}150^{\circ}$ в.д.) в холодную половину года в период 1948–2007 гг.

Приведенные на рис. 4–6 термические характеристики ВДС в тестовых районах трех океанов оказались, как уже отмечены выше, в общих чертах качественно и количественно подобными, включая структуру средних за отдельные фазы климата значений теплосодержания.

Выявленные по результатам моделирования изменения теплосодержания ВДС во 2-й половине XX – в начале XXI вв. характеризовались совпадающими по времени фазами теплонакопления и тепловой разгрузки. Примечательным фактом является то, что сроки начала и конца фазы тепловой разгрузки ВДС (1975–1999 гг.) в Атлантическом, в Тихом и Южном океанах оказались практически одинаковыми с точностью до года, свидетельствуя о квазисинхронности рассматриваемого глобального процесса (Byshev et al., 2017). В данном случае речь идет о планетарном мультидекадном перераспределении тепла в климатической системе Земли, с которым совпадают по времени начало и развитие известного (IPCC, 2013) глобального потепления климата в последней четверти XX столетия.

В связи с этим небезынтересно отметить, что справедливость гипотезы о переходе климатической системы в начале XXI столетия к фазе более континентального климата (Byshev et al., 2017) подтверждается исследованием (Mao et al., 2017), в котором с 2003 по 2012 гг. обозначены тенденции сокращения содержания водяного пара в атмосфере практически повсеместно над океанами и континентами.

Наряду с планетарным характером МОСТОК обращают на себя внимание региональные особенности изменчивости температуры воды. В частности, на протяжении второй половины прошлого столетия ТПО в тестовых районах изменялась более существенно в Тихом океане, а теплосодержание – в Атлантике. Это различие, очевидно, связано с тем, что в Северной Атлантике имеет место глубокая

конвекция до 1000–1200 м, а в Тихом океане более значительная плотностная стратификация препятствует развитию конвекции глубже 500–600 м. Из этого следует, что об интенсивности теплоотдачи океана в атмосферу можно судить не столько по изменению аномалий ТПО, сколько по сокращению теплосодержания ВДС.

Анализ материалов наблюдений по программе МЕГАПОЛИГОН (1987 г.) в регионе энергоактивной зоны (ЭАЗО) Куроисио и Курильского течения (рис. 5) показал (Бышев, Снопков, 1990), что бюджет тепла поверхности океана в период работ на полигоне был отрицательным: турбулентные потоки явного и скрытого тепла из океана в атмосферу, а также эффективное тепловое излучение превышали приток тепла к поверхности океана за счет коротковолновой солнечной радиации.

В 1990 г. эксперимент АТЛАНТЭКС-90 (Бышев и др., 1993) был направлен на изучение особенностей Ньюфаундлендской ЭАЗО. Изменчивость характеристик среды в северо-западной части Атлантического океана (рис. 4) свидетельствовала о существенном выхолаживании значительного по мощности ВДС океана, т.е. о его тепловой разгрузке. В совокупности с данными эксперимента МЕГАПОЛИГОН этот вывод дает полное основание использовать их в качестве подтверждения факта тепловой разгрузки Мирового океана в период глобального потепления климата на континентах в 1975–1999 гг., признаком которой явилось формирование отрицательных аномалий ТПО на значительных по площади акваториях Атлантического и Тихого океанов (Бышев и др., 2009).

Выявленная по данным моделирования и непосредственных натурных экспериментов климатически значимая эволюция термических характеристик ВДС океана должна определенным образом отражаться на ходе стерической (плотностной) моды колебаний уровня океана. Нами была поставлена цель попытаться использовать возможность контроля этого уровня с помощью стандартной спутниковой альтиметрии для решения обратной задачи – диагностического отслеживания изменений термического состояния ВДС. На первом этапе предполагалось обратиться к данным альтиметрического мониторинга уровня для ретроспективных оценок с тем, чтобы с их помощью найти приемлемые подходы к последующему созданию основ прогностической методики.

Анализ спутниковых альтиметрических наблюдений 1993–2016 гг. позволил получить оценки эволюции мультидекадных колебаний уровня океана, располагая двумя фрагментами фаз климата: тепловой разгрузки ВДС (1993–1999 гг.) и теплонакопления ВДС (2000–2016 гг.). Наблюденные и сглаженные (скользящие пятилетние) аномалии уровня океана в атлантическом, тихоокеанском и южноокеанском тестовых районах представлены на рис. 7а,б,в. Можно полагать, что принятое в работе временное осреднение позволяет наблюдать те изменения уровня, которые, прежде всего, связаны с мультидекадными процессами изменения теплосодержания ВДС океана.

Выполненное скользящее сглаживание спутниковых измерений позволило эффективно подавить сезонные и короткопериодные (менее 5 лет) колебания уровня океана. Малая длина ряда пока не позволяет оптимально выделить из суммар-

ного сигнала междекадные гармоники, которые явно прослеживаются в материалах нашего анализа. По амплитуде такие возмущения уровня, как следует из рис. 7а,б,в, могут составлять величину порядка 4–6 см, что сравнимо с величиной перепада высоты стерического уровня для районов Атлантического и Тихого океанов, рассчитанных нами по изменениям теплосодержания ВДС (рис. 4–5), произошедшим в период с 1975 по 1999 гг. Очевидно, что наблюдаемые величины средних аномалий уровня, связаны с климатически значимой изменчивостью термодинамического состояния водной массы ВДС. Данная связь явно прослеживается даже визуально при сравнении рис. 4–6 и рис. 7а, б, в, на которых средние величины теплосодержания в океане и высоты уровня в определенных районах обладают достаточным фазовым подобием. Этот факт позволяет рассчитывать на перспективность дальнейшего применения спутниковых альтиметрических наблюдений в климатических целях.

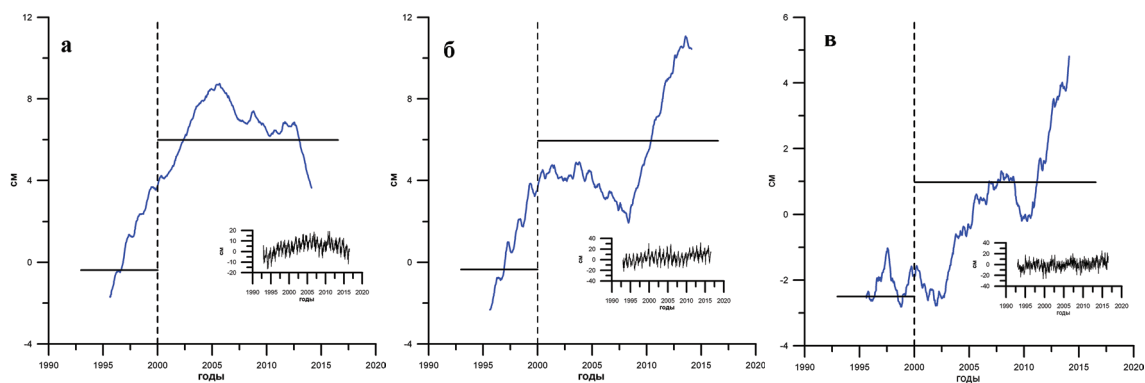


Рис. 7. (а) ход аномалий уровня (5-летнее скользящее осреднение) в Атлантическом океане (60°с.ш., 35° з.д.) по данным (на вставке) спутниковых измерений www.sealevel.colorado.edu. Горизонтальные линии – средние аномалии ожидаемого стерического уровня за периоды с 1993 г. по 1999 г. и с 2000 г. по 2016 г.

(б) в тестовом районе Тихого океана (42°с.ш., 156°в.д.)

(в) в тестовом районе Южного океана (55°ю.ш., 150°в.д.).

Заключение

С помощью анализа данных наблюдений и численного моделирования эволюции термической структуры вод ВДС в тестовых районах Мирового океана исследована внутривековая мультидекадная осцилляция его теплосодержания (МОСТОК). Обнаружены определенные признаки климатической роли ВДС океана, проявляющего себя в качестве «заряжаемого аккумулятора» с обратной связью в системе его крупномасштабного взаимодействия с атмосферой. В работе показано, что во время фазы МОСТОК (1975–1999 гг.) ВДС океана в рассмотренных районах выхолаживался, вследствие чего переходившее в атмосферу океанское тепло и влага способствовали наблюдаемому росту приповерхностной температуры на континентах.

Апробированный в работе метод диагностического детектирования эволюции термического состояния ВДС с помощью спутниковых данных наблюдений за уровнем океана дал вполне обнадеживающие результаты. Совместный анализ

доступных материалов альтиметрических измерений и данных численного моделирования соответствующих характеристик океанских водных масс подтвердил перспективность использования соответствующей спутниковой информации в климатических исследованиях.

Работа выполнена в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, тема № 0149-2018-0001.

Литература

- Анисимов М.В., Бышев В.И., Залесный В.Б., Мошонкин С.Н.* Мультидекадная изменчивость термической структуры вод Северной Атлантики и ее климатическая значимость // Доклады РАН. 2012. Т. 443. № 3. С. 372–376.
- Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Старицин Д.К., Фукс В.Р., Шилов И.О.* Изменчивость уровня северо-западной части Тихого океана. СПб.: Изд-во «СМИО Пресс», 2009. 309 с.
- Бышев В.И., Копрова Л.Н., Навроцкая С.Е., Позднякова Т.Г., Романов Ю.А.* Аномальное состояние Ньюфаундлендской энергоактивной зоны в 1990 г. // Доклады АН СССР. 1993. Т. 331. № 6. С. 735–738.
- Бышев В.И.* Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы. М.: Наука, 2003. 343 с.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В.* О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438. № 6. С. 817–822.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В.* Эль-Ниньо как следствие Глобальной атмосферной осцилляции в динамике климатической системы Земли // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446. № 1. С. 89–94.
- Бышев В.И., Снопков В.Г.* О формировании поля температуры воды поверхности океана в энергоактивной зоне северо-западной части Тихого океана на примере полигона «МЕГАПОЛИГОН» // Метеорология и гидрология. 1990. № 11. С. 70–77.
- Бышев В.И., Фигуркин А.Л., Анисимов И.М.* Междекадная изменчивость термической структуры вод верхнего деятельного слоя на северо-западе Тихого океана // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 2. С. 240–244.
- Бышев В.Н., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В.* О пространственной неоднородности некоторых параметров глобальной изменчивости современного климата // Доклады Академии наук. 2009. Т. 426. № 4. С. 543–548.
- Гусев А.В., Дианский Н.А.* Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948–2007 гг. с помощью модели INMOM // Изв. РАН Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 3–15.
- Зверева А.Е.* Низкочастотные волновые движения в Японском море: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. геогр. наук: 25.00.28. СПб., 2017. 310 с.
- Лебедев С.А., Костяной А.Г.* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Издательский центр «Море» Международного института океана, 2005. 366 с.
- Мошонкин С.Н., Дианский Н.А., Эйдинов Д.А., Багно А.В.* Модель циркуляции Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана // Океанология. 2004. Т. 44. № 6. С. 811–825.
- Пономарев В.И., Дмитриева Е.В., Шкорба С.П., Карнаухов А.А.* Изменение планетарного климатического режима на рубеже XX–XXI веков // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21. № 1. С. 160–169. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-160-169.

- Троицкая Ю.И., Рыбушкина Г.В., Соустова И.А., Баландина Г.Н., Лебедев С.А., Костяной А.Г., Панютин А.А., Филина Л.В. Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 2. С. 169–185.
- Фукс В.Р. Уровень Мирового океана как индикатор глобального потепления // География и современность: Сб. СПбГУ. 2005. Вып. 10. С. 73–93.
- Bond N.A., Overland J.E., Spillane M., Stabeno P. Recent shifts in the state of the North Pacific // Geophysical Research Letters. 2003. Vol. 30. No. 23. P. 21–83. DOI:10.1029/2003GL018597.
- Byshchey V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174. No. 7. P. 2863–2878. DOI: 10.1007/s00024-017-1557-3.
- Chen J.L., Pekker, T., Wilson C.R., Tarley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Long-term Caspian Sea level change // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. P. 6993–7001. DOI: 10.1002/2017GL073958.
- Chu P.C. Global upper ocean heat content and climate variability // Ocean Dynamics. 2011. DOI: 10.1007/s10236-011-0411-x.
- De Viron O., Dickey J.O., Ghil M. Global modes of climate variability // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. P. 1832–1837. DOI:10.1002/grl.50386.
- Gill A.E., Niiler P.P. The theory of the seasonal variability in the ocean // Deep-Sea Reseach. 1973. Vol. 20. P. 141–177.
- IPCC, 2013, Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed. Stocker, T.F. et al.). Cambridge University Press. Cambridge. UK and New York. NY. USA.
- Large W.G., Yager S.G. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: the data sets and flux climatologies // Climate and Global Dynamics Division. National Center for Atmospheric Research. Boulder. Colorado. 2004. 105 p.
- Lee T., McPhaden M.J. Decadal phase change in large-scale sea level and winds in the Indo-Pacific region at the end of the 20-th Century // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35. L01605. DOI: 10.1029/2007 GL032419j.
- Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Locamini R.A., Garcia H.E. Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. L07608. DOI: 10.1029/2008 GL037155.
- Liman J.M., Good S.A., Gouretski V.V. Robust warming of the global upper ocean // Nature. 2010. Vol. 465. DOI: 10.1038/nature09043.
- Mao K., Chen J., Li Z., Ma Y., Song Y., Tan X., Yang K. Global Water Vapor Content Decreases from 2003 to 2012: An Analysis Based on MODIS Data // Chin.Geogra. Sci. 2017. Vol. 27. No. 1. P. 1–7. DOI: 10.1007/s11769-017-0841–6.
- Minobe S.A. 50–70-year climatic oscillation over the North Pacific and North America // Geophysical Research Letters. 1997. Vol. 24. P. 683–686.
- Steinman B.A., Mann M.E., Miller S.K. Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperature // Science. 2013. Vol. 347. P. 988–991. DOI: 10.1126/science.1257856.
- Tsonis A.A., Swanson K., Kravtsov S. A. New dynamical mechanism for major climate shifts // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. L13705. DOI:10.1029/2007 GL030288.

**OCEANIC FACTOR OF MULTI-DECADAL VARIABILITY OF
MODERN CLIMATE AND PROSPECTS
OF ITS MONITORING**

**Byshev V.I., Serykh I.V., Sidorova A.N.,
Sklyarov V.E., Anisimov M.V.**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: labbyshev@ocean.ru
Submitted 07.09.2018, accepted 01.10.2018*

Multi-decadal variability of the modern climate (fluctuations of 50–70 years) is one of the most urgent current problems in the earth Sciences. The actual oscillation consists of two phases, each of which is 25–35 years: the phase when the upper active layer (UAL) of the world ocean, giving sensitive and latent heat to the atmosphere, makes a kind of its thermal discharge, and the phase of a continental climate, when the ocean UAL accumulates heat, seeking to restore its initial state. There is reason to believe that the variability under consideration reflects the internal dynamics of the ocean-atmosphere-continent climate system. The presence of planetary structures in the GAO atmosphere (global atmospheric oscillation) and in the MOSTOK ocean (multi-decadal oscillation of ocean heat content) allows us to understand the reproduction of the observed rhythm of the climate system. The most sensitive to the climate system are changes in the phases of climate, as a result of which there are sudden qualitative shifts, accompanied by a certain restructuring of the General circulation of the ocean and the atmosphere. So in the ocean, when the climate phase changes, either deep convection intensifies (with the thermal unloading of the ocean UAL), or it weakens, and possibly stops (with the accumulation of heat of the UAL). In the atmosphere of the changing phases of a climate impact on monsoon circulation: a more continental climate phase corresponds to a strengthening of the monsoon circulation with all accompanying this process features. The forecast of climate phase changes is therefore important for the economic, social and political life of society. In turn, the quality of the forecast is associated with an understanding of the nature of the observed variability and the representation of the mechanism of this phenomenon. In the work for some areas of the world ocean the evolution of the thermal structure of the UAL with the dynamics of the steric mode of oscillations of the level determined by satellite altimetric observations is compared. It was found that the sea level rise between the time phases of 1993–1999 and 2000–2015 it was 4–6 cm and corresponded to the increase in the level that would occur with the observed increases in the heat content of the ocean UAL. It is concluded that on inter-decadal time scales, along with ocean surface temperature (SST) data, altimetric satellite observations can be used in the future to identify regional sources and heat sinks in the ocean.

Keywords: ocean, atmosphere, modern climate, circulation, deep convection, anomalies, temperature, atmospheric pressure, climate variability, climate scenario, steric level

References

Anisimov M.V., Byshev V.I., Zalesniy V.B., and Moshonkin S.N. Multi-decade variability of the North-Atlantic Ocean thermal structure and its climate significance. *Doklady Earth Sciences*, 2012, Vol. 443, No. 3, pp. 372–376.

- Belonenko T.V., Koldunov V.V., Staritsin D.K., Fuks V.R., and Shilov I.O.* *Izmenchivost' urovnya severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana (Sea-surface level variability in the north-western Pacific)*. Saint-Petersburg: Izd-vo «SMIO Press», 2009, 309 p.
- Bond N.A., Overland J.E., Spillane M., and Stabeno P.* Recent shifts in the state of the North Pacific. *Geophysical Research Letters*, 2003, Vol. 30, No. 23, 2183 p., doi:10.1029/2003GL018597.
- Byshev V.I., Figurkin A.L., and Anisimov I.M.* Interdecadal Variability in Thermal Structure of Water in the Upper Active Layer in the Northwestern Pacific Ocean. *Doklady Earth Sciences*, 2017, Vol. 477, Part 1, pp. 1343–1347.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., and Anisimov I.M.* Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content. *Pure and Applied Geophysics*, 2017, Vol. 174, No. 7, pp. 2863–2878, doi: 10.1007/s00024-017-1557-3.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V.* El Niño as a consequence of the global oscillation in the dynamics of the earth's climatic system. *Doklady Earth Sciences*, 2012, Vol. 446, No. 1, pp. 1089–1094.
- Byshev V.I.* *Sinopticheskay krupnomasshtabnay ismenchivost okeana i atmosferu (Synoptic and large-scale variability of ocean and atmosphere)*. Moskva: Nauka, 2003, 343 p.
- Byshev V.I. and Snopkov V.G.* On surface temperature field forming in energy-active zone of the North-West Pacific Ocean in context of the MEGAPOLYGON Project. *Meteorology and Hydrology*, 1990, Vol. 11, pp. 70–77.
- Byshev V.I., Koprova L.I., Navrotkaya S.E., Pozdnyakova T.G., and Romanov Yu.A.* Abnormal state of Newfoundland Energy Active Zone in 1990. *Doklady Earth Sciences*, 1993, Vol. 331, No. 6, pp. 735–738.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V.* On the spatial nonuniformity of some parameters of the global variations of the recent climate. *Doklady Earth Sciences*, 2009, Vol. 426, No. 4, pp. 705–709.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V.* Phase variability of some characteristics of the present-day climate in the Northern Atlantic region. *Doklady Earth Sciences*, 2011, Vol. 438, No. 2, pp. 887–892.
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tarley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., and Safarov. E.S.* Long-term Caspian Sea level change. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, Vol. 44, pp. 6993–7001, doi: 10.1002/2017GL073958.
- Chu P.C.* Global upper ocean heat content and climate variability. *Ocean Dynamics*, 2011, Vol. 61, doi:10.1007/s10236-011-0411-x.
- De Viron O., Dickey J.O., and Ghil M.* Global modes of climate variability. *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, pp. 1832–1837, doi:10.1002/grl.50386.
- Fuks V.R.* Uroven' Mirovogo okeana kak indikator global'nogo potepleniya (The Global sea level as an indicator of global warming). *Geografiya i sovremennost'*, Saint-Petersburg: 2005, Vol. 10, pp. 73–93.
- Gill A.E. and Niiler P.P.* The theory of the seasonal variability in the ocean. *Deep-Sea Reseach*, 1973, Vol. 20, pp. 141–177.
- Gusev A.V. and Dianskiy N.A.* Numerical simulation of the global ocean circulation and its climatic variability for 1948–2007 using INMOM. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, Vol. 50, No. 1, pp. 3–15.
- IPCC, 2013, *Climate Change: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed. Stocker, T.F. et al.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA: 2013.

- Large W.G. and Yager S.G. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: the data sets and flux climatologies. *Climate and Global Dynamics Division. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado*: 2004, 105 p.
- Lebedev S.A. and Kostyanoi A.G. Sputnikovaya al'timetriya Kaspiiskogo morya (Satellite altimetry of the Caspian Sea), Moskva: Izdatel'skii tsentr «More» Mezhdunarodnogo instituta okeana, 2005, 366 p.
- Lee T. and McPhaden M.J. Decadal phase change in large-scale sea level and winds in the Indo-Pacific region at the end of the 20-th Century. *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, L01605, doi: 10.1029/2007 GL032419j.
- Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Locamini R.A., and Garcia H.E. Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, L07608, doi: 10.1029/2008 GL037155.
- Liman J.M., Good S.A., and Gouretski V.V. Robust warming of the global upper ocean. *Nature*, 2010, Vol. 465, doi: 10.1038/nature09043.
- Mao K., Chen J., Li Z., Ma Y., Song Y., Tan X., and Yang K. Global Water Vapor Content Decreases from 2003 to 2012: An Analysis Based on MODIS Data. *Chin. Geogra. Sci.* 2017, Vol. 27, No. 1, pp. 1–7, doi: 10.1007/s11769-017-0841-6.
- Minobe S.A. 50–70-year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophysical Research Letters*, 1997, Vol. 24, pp. 683–686.
- Moshonkin S.N., Dianskiy N.A., Eidinov L.A., and Bagno A.V. Coupled Northern Atlantic and Arctic Ocean circulation modeling. *Oceanology*, 2004, Vol. 44, No. 6, pp. 759–773.
- Ponomarev V.I., Dmitrieva E.V., Shkorba S.P., and Karnaukhov A.A. Izmenenie planetarnogo klimaticheskogo rezhima na rubezhe XX–XXI vekov (Change of the global climate regime at the turn of the XX–XXI centuries). *Vestnik MGTU*, 2018, Vol. 21, No. 1, pp. 160–169, doi: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-160-169.
- Steinman B.A., Mann M.E., and Miller S.K. Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperature. *Science*, 2013, Vol. 347, pp. 988–991, doi: 10.1126/science.1257856.
- Troitskaya Yu.I., Rybushkina G.V., Soustova I.A., Balandina G.N., Lebedev S.A., Kostyanoi A.G., Panyutin A.A., and Filina L.V. Sputnikovaya al'timetriya vnutrennikh vodoemov (Satellite altimetry of inland water bodies). *Vodnye resursy*, 2012, Vol. 39, No. 2, pp. 169–185.
- Tsonis A.A., Swanson K., and Kravtsov S.A. New dynamical mechanism for major climate shifts. *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, L13705, doi:10.1029/2007 GL030288, 2007.
- Zvereva A.E. Nizkochastotnye volnovye dvizheniya v Yaponskom more: *Diss. kand. geogr. nauk* (Low-frequency wave motions in the Japan/East Sea. Cand. geograph. sci. thesis). Saint Peterburg: 2017, 297 p.