

ОБЩАЯ ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ И КЛИМАТИЧЕСКОЙ РОЛИ ГЛОБАЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ И ОКЕАНИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ

Романов Ю.А.¹, Нейман В.Г.¹, Бышев В.И.¹, Серых И.В.¹, Сонечкин Д.М.¹,
Гусев А.В.^{1,2}, Кононова Н.К.³, Пономарев В.И.⁴, Сидорова А.Н.¹,
Фигуркин А.Л.⁵, Анисимов М.В.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: vneiman2007@yandex.ru

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, 119333, Москва,
Губкина ул., д.4, e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com

³Институт географии РАН, , д. 29, Старомонетный переулок, 119017, Москва, Россия,
e-mail: ninakononova@yandex.ru

⁴Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, Балтийская ул., д.43, e-mail: pvi711@yandex.ru

⁵Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,
690091, г. Владивосток, Шевченко пер., д.4, e-mail: figurkin@tinro.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2019, одобрена к печати 30.05.2019

Обширный ряд известных разномасштабных процессов, характеризующих изменчивость глобальной климатической системы, пополнился в XXI веке открытием глобальных атмосферной и океанической осцилляций. Межгодовая глобальная атмосферная осцилляция (ГАО) была обнаружена в процессе исследования физического механизма и поиска реальных индикаторов известных событий Эль-Ниньо (Бышев и др., 2012). Первое сообщение о междекадной осцилляции теплосодержания верхнего деятельного слоя в океане (МОСТОК) было опубликовано в 2016 г. (Бышев, Нейман, Романов, 2016). Последующие исследования этих крупномасштабных природных процессов в атмосфере и в океане позволили сформулировать реальный новый подход к развитию общей теории и методики прогнозирования изменчивости современного климата (Byshev et al., 2017; Бышев и др. 2018; Serykh et al., 2019). В настоящей статье приводится краткий аннотированный обзор соответствующих публикаций, посвященных обоснованию и аналитическому описанию основных представлений о короткопериодной изменчивости современного климата, связанной с глобальными эффектами межгодовой и мультидекадной атмосферными осцилляциями (ГАО) и междекадной осцилляцией теплосодержания верхнего деятельного слоя Мирового океана (МОСТОК).

Ключевые слова: океан, атмосфера, климат, температура, соленость, межгодовая глобальная атмосферная осцилляция, мультидекадная глобальная атмосферная осцилляция, верхний деятельный слой, теплосодержание, междекадная осцилляция теплосодержания океана

Введение

Короткопериодная изменчивость климата Земли относится к числу наиболее остро восприимчивых человечеством природных процессов, имеющих фунда-

ментальное научное и большое практическое значение (Изменение климата, 1980; Глобальный климат, 1987; Монин, Сонечкин, 2005; Bronnimann et al., 2009; Современные глобальные изменения природной среды, 2012). Есть основания полагать, что наблюдаемые аномальные изменения в динамике современной климатической системы являются следствием нестационарности этого процесса на вековом масштабе. Основными характеристиками, по которым обычно определяется это состояние, считаются приземная температура воздуха (ТПВ) и температура поверхности океана (ТПО), общая циркуляция атмосферы (ОЦА), турбулентные потоки тепла (ПТ) на границе между океаном и атмосферой, облачность. Известно (Бышев, Нейман, Позднякова и др., 2001; Бышев, Кононова, Нейман и др., 2002; Бышев, Кононова, Нейман и др., 2004), что современной климатической системе, которая в целевом анализе условно ограничивается вековым масштабом, присущи два ключевых статистически достоверных режима короткопериодной изменчивости: наиболее высокочастотные (межгодовые) квазипериодические возмущения с периодом от 2 до 8 лет и мультидекадные колебания от 20 до 60 лет. Проявления обоих этих типов изменчивости наблюдаются на фоне внутривековых климатических трендов, происхождение которых обычно связывается с антропогенным воздействием на гидрометеорологические параметры окружающей среды (IPCC, 2013). Есть основания полагать, что относительно короткопериодные внутривековые режимы изменчивости динамики климатической системы, очевидно, представляют собой ее вынужденные возмущения и автоколебания, связанные с процессами крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы (Монин, 1977; Кондратьев, 1992).

ТПО играет роль важного граничного условия, которое оказывает воздействие на интенсивность и направленность теплообмена атмосферы с океаном. Турбулентные потоки явного и скрытого тепла через свободную поверхность океана служат одним из основных источников тепловой энергии атмосферы. За счет значительной теплоемкости и большого теплозапаса океан способен непрерывно поддерживать энергоснабжение атмосферы в локальном и региональном масштабах. Пространственно-временная изменчивость этого энергоснабжения непосредственно отражается на системе циркуляции атмосферы, так что термические характеристики верхнего слоя океана в определенном отношении предопределяют особенности текущих погодных условий на Земле и влияют на состояние климатической системы в целом (Динамика климата, 1988). Температура поверхности океана определяется как его внутренними процессами, так и атмосферными факторами. Крупномасштабное взаимодействие океана с атмосферой, наиболее эффективное на масштабе порядка 1000 км, в реально осязаемой форме проявляется в виде положительных (до нескольких градусов °C) аномалий ТПО в относительно тонком (~100–150 м) поверхностном слое, либо значительно меньших по абсолютной величине, но проникающих на глубину до нескольких сотен метров отрицательных аномалий (Антонов, 1990; Бышев, Усыченко, 1995; Бышев, Нейман, 2000; Анисимов и др., 2012). Иного рода пространственные аномалии температуры воды обоих знаков, возникающие за счет внутренних термодинамических процессов в океане (Бышев, Сноп-

ков, 1990) – адвекции тепла течениями трансфронтального обмена, синоптической вихревой активности, имеют величину около 1–3°C и обладают на порядок меньшим горизонтальным масштабом, но захватывают весьма значительный по толщине верхний слой океана – до 500 м и более. Поскольку оба фактора, внутренний и внешний, действуют одновременно, разделить их вклады в суммарную изменчивость температуры верхнего слоя океана порой весьма сложно (Бышев и др., 1996).

Неравномерность распределения вертикальных потоков тепла по акватории Мирового океана непрерывно генерирует бароклинный слой атмосферы и ее доступную потенциальную энергию. Переход доступной потенциальной энергии в кинетическую формирует и поддерживает среднюю зональную атмосферную циркуляцию, ее вихревую активность, а также глобальные ячейки циркуляции, в которых осуществляется крупномасштабный меридиональный обмен теплом, влагой, импульсом (Пальмен, Ньютон, 1973; Вебстер, 1988). Перемежаемость потоков тепла во времени на границе двух сред сопровождается колебаниями интенсивности общей циркуляции и циклогенеза в атмосфере, с чем непосредственно связана короткопериодная изменчивость современного климата.

Крупномасштабная вихревая активность атмосферы является основным фактором, определяющим состояние и изменчивость погоды на Земле (Динамика погоды, 1988). Аналогично атмосфере, синоптические вихревые возмущения имеют место и в Мировом океане (Atlas POLYMODE, 1986; Эксперимент МЕГАПОЛИГОН, 1992), формируя в нем свои «погодные условия». Циклогенез в этих двух взаимодействующих средах, реализуя механизм бароклинной неустойчивости, осуществляет процесс крупномасштабного турбулентного массо- и энергообмена, направленного на разрушение непрерывно формирующейся вертикальной и горизонтальной стратификации гидрометеорологических характеристик в планетарном масштабе. Многолетние срочные наблюдения на глобальной сети метеорологических станций, позволяющие следить за энергетикой и кинематикой вихревых возмущений в атмосфере, показывают, что в отдельные промежутки времени происходят значительные вариации интенсивности циклогенеза и изменение траекторий генерального перемещения вихревых образований. Наиболее значительные контрасты погодных условий возникают при смене направлений турбулентного переноса с зонального на меридиональный и наоборот (Кононова, 2009), после чего начинает превалировать зональный перенос тепла, влаги и других свойств, либо преобладает межширотный обмен.

Длительные периоды господства зонального или меридионального макротурбулентного обмена в атмосфере принято отождествлять с различными фазами климата (Power, Smith, 2007; Lu et al., 2007). Аномальные погодные ситуации, все более часто возникающие в последнее время почти повсеместно, наводят на мысль об их возможной связи с глобальными изменениями климата. Если в данном отношении определяющими являются именно климатические изменения, то установление их естественных и антропогенных причин приобретает дополнительный смысл в интересах оценки долгосрочных тенденций формирования глобальных и региональ-

ных погодных условий. Недаром эта и подобные ей задачи были положены в основу многих крупных национальных и международных климатических программ, например, таких, как GARP, TOGA, ACSYS, WOCE, CLIVAR и др. Значительный вклад в понимание наблюдаемых в океане и атмосфере процессов, а также взаимодействия этих двух наиболее важных элементов климатической системы Земли, связан с результатами крупномасштабных отечественных гидрофизических экспериментов в Мировом океане таких, как РАЗРЕЗЫ, ПОЛИГОН-70, ПОЛИМОДЕ, МЕГАПОЛИГОН, АТЛАНТЕКС-90 и др.

Мультикомпонентность, многофакторность и, возможно, интранзитивность климатической системы (Lorenz, 1975; Монин, Шишков, 1979; Emanuel, 2002) превращают ее в исключительно сложный и слабо детерминированный объект исследований. Разнообразные глобальные и региональные особенности современного климата, суперпозиция которых, по-видимому, формирует текущие погодные условия, могут породить предположение о случайности поведения климатической системы и ее предсказуемости лишь в вероятностном смысле (Hasselmann, Frankignoul, 1977). Вместе с тем, в результате совместного анализа многолетних рядов измерений океанических и метеорологических характеристик удастся обнаружить статистически обеспеченные признаки глобальных физических связей между процессами в океане и атмосфере, обладающих определенной фазовой устойчивостью (Chiang, Kushnir, 2000; Latif, 2001; Mo, Hakkinen, 2001).

**Основной фактор короткопериодной климатической изменчивости.
Межгодовая глобальная атмосферная осцилляция
и ее связь с явлением Эль-Ниньо**

В ходе исследования физической природы и потенциальных предикторов тихоокеанского явления Эль-Ниньо было обнаружено, что одним из значимых его предвестников может быть возникающая накануне этого события крупномасштабная отрицательная аномалия температуры поверхности Индийского океана (Бышев и др., 2012). Эта океаническая аномалия сопровождается ростом атмосферного давления, соответствующая положительная аномалия которого постепенно распространяется на восток вдоль экватора до области планетарной конвекции, расположенной в регионе Индонезийских островов. Западный ветер, возникающий на восточной периферии указанной барической аномалии, приводит к реверсу тихоокеанской ячейки экваториальной атмосферной циркуляции Уокера и к последующей смене полярности зонального теплового диполя в поверхностном слое экваториальной зоны Тихого океана, означающей кульминацию явления Эль-Ниньо (Бышев, Иванов, Нейман и др., 2008).

Помимо этой индоокеанской термобарической аномалии были выявлены очевидные признаки формирования накануне очередного события Эль-Ниньо ряда других крупномасштабных аномалий различных знаков в планетарном поле атмосферного давления. В ряде работ (Бышев и др., 2012; Анисимов и др., 2014; Бышев,

Нейман, Романов, Серых, 2014; Бышев, Нейман, Пономарев и др., 2014; Бышев и др., 2016) эти события были интерпретированы как проявление межгодовой глобальной осцилляции (ГАО) в динамике современной климатической системы. На основе этой гипотезы высказано предположение о том, что весь известный комплекс событий тихоокеанского Эль-Ниньо является следствием и региональным звеном планетарной структуры этого глобального атмосферного колебания. Поскольку события Эль-Ниньо относятся к числу наиболее значимых факторов внутривековой изменчивости как регионального, так и глобального климата (Петросьянц и др. 2005; Дийкстра, 2007; Roemmich, Gilson, 2011; Bronnimann, 2007; Terray, 2011; Ding, Li, Tseng, 2015), научные и практические проблемы, связанные с этим явлением, весьма интенсивно изучаются на протяжении нескольких последних десятилетий экспериментально (Уоллес, Блэкман, 1988; McPhaden, Busalacchi, Cheney et al., 1998) и теоретически (Вебстер, 1988; Neelin, Battisti, Hirst et al., 1998). Однако до последнего времени еще никому не удавалось получить однозначные ответы на основные принципиальные вопросы о том, каковы физические механизмы и пространственный масштаб данного природного события. Большинство исследователей склонно рассматривать его как некий региональный процесс, условно ограниченный пределами Тихоокеанской климатической системы, главным динамическим фактором которой принято считать явления ЭНЮК) (аббревиатура от Эль-Ниньо-Южное Колебание). Здесь и в дальнейшем под этим термином подразумеваются теплая (Эль-Ниньо) и холодная (Ла-Нинья) фазы квазициклических возмущений в динамике климатической системы океан–атмосфера Пацифики, индексом которых является так называемое Южное колебание – изменение нормированной разности атмосферного давления между пунктами наблюдений на о. Таити и в порту Дарвин (Северная Австралия). В тех случаях, когда внимание обращалось на глобальное климатическое значение рассматриваемого явления (Bronnimann, 2007; Roemmich, Gilson, 2011), его роль трактовалась, как правило, в контексте дальних связей, возникающих в системе опосредованного взаимодействия региональных климатических структур с известным источником возмущений, локализованным в тихоокеанском регионе. Одними из немногих исключений в этом отношении являлись отдельные публикации (Козленко, Мохов, Смирнов, 2009; Terray, 2011), где событиям Эль-Ниньо придана категория действительно глобального климатического процесса, исходный импульс которого авторы этих работ ассоциируют с акваториями Атлантического и Южного океанов. Недостаточно обоснованной представляется гипотеза о стохастичности процесса Эль-Ниньо (Blanke, et al., 1997; Neelin, et al., 1998; Дийкстра, 2007). Квазициклическость его появления с частотой в среднем около 3.5 лет и довольно устойчивая приуроченность его кульминации к лету Южного полушария (декабрь–февраль), а его начало – к фазам равноденствия (радиационное равновесие) и переходного состояния муссонных атмосферных циркуляций Индопацифики (бореальные весна или осень) (Climate Diagnostic Bulletin, 1989/2006), явно свидетельствуют о детерминированном характере причин, вызывающих это природное событие. С другой стороны, обращают на себя внимание пока

еще не получившие адекватного объяснения нестабильность интенсивности Эль-Ниньо в течение последнего столетия – ослабление его основных признаков в 40–70-е гг. и их усиление в 80–90-е гг. (Power, Smith, 2007), а также многообразие форм его проявления (каноническая, «Модоки», холодная мода, теплая мода и пр.) (Lee, McPhaden, 2010). Эти и другие, им подобные, факты свидетельствовали о том, что исследование физической природы этого, имеющего явно глобальное климатическое значение, феномена еще не закончено и требует применения новых подходов. В работе (Бышев и др., 2012) была поставлена задача определения пространственно-временных характеристик сигнала Эль-Ниньо в планетарном масштабе путем исследования эволюции глобальных гидрофизических и гидрометеорологических полей океана и атмосферы в ходе данного процесса, а также анализа соответствующих данных с определенной заблаговременностью до начала и после завершения известных событий ЭНЮК.

В первых публикациях о межгодовой глобальной атмосферной осцилляции (Бышев и др., 2012) она была представлена в виде аномальной структуры планетарных барического и термического приповерхностных полей, в которых, помимо всего прочего, находят отражение соответствующие моды всех известных так называемых колебаний: (Северо-Атлантическое колебание (САК), Арктическое колебание (АК), Эль-Ниньо Южное колебание, Северо-Тихоокеанское колебание (СТК) и др.), то есть, возмущений гидрометеорологических характеристик между основными региональными центрами действия атмосферы. На рис. 1, где показана величина фазовой амплитуды межгодовой ГАО, видно, что центральным элементом барической структуры этой осцилляции, в прямом и переносном смысле, является крупномасштабная положительная аномалия в экваториально-тропической области, опоясанная зоной пониженного давления вдоль ее внешней границы. Положительная экваториальная аномалия атмосферного давления простирается в зональном направлении от западной границы Атлантического океана на восток до линии перемены дат, а в меридиональном плане – между 30°ю.ш. и 30°с.ш. Ширина прилегающей зоны пониженного давления за пределами северной и южной границ положительной аномалии изменяется в пределах 2000–3000 км.

На рис. 2 показана величина амплитуды в барическом поле междекадной ГАО, под влиянием которой происходит смена климатических сценариев в Северном полушарии (Бышев и др., 2011). При сравнении рис. 1 и рис. 2 обращают на себя внимание как общность, так и принципиальные отличия структурных особенностей ГАО на разных временных масштабах. Видно, что каждая из двух обнаруженных временных мод ГАО характеризуется положительной аномалией атмосферного давления в экваториально-тропической области с эпицентром в Индийском океане (Бышев и др., 2014). Показанная на рис. 2 амплитуда междекадной ГАО менее интенсивна, но захватывает больший по широте пояс. Кроме того, если на межгодовом временном масштабе в приполярных широтах обоих полушарий наблюдаются пояса повышенного давления, то на междекадном масштабе пониженным атмосферным давлением характеризуется вся область за пределами центральной положительной аномалии.

Было отмечено, что межгодовая ГАО по многим признакам связана с сезонным ходом атмосферных процессов, а ее возникновение приурочено, как правило, к периодам равновесного состояния климатической системы (Бышев и др., 2012). Это состояние возникает каждый раз, когда Солнце располагается над земным экватором (радиационное равновесие), а система глобальной муссонной циркуляции атмосферы переходит в неустойчивый межфазовый режим. Начальный импульс ГАО, как показано в работе (Бышев и др., 2011), непосредственно связан с ростом атмосферного давления в экваториально-тропической области Атлантического и Индийского океанов (термический прилив), где в указанный выше период наблюдаются отрицательные аномалии ТПО.

Есть основание полагать, что междекадная ГАО (рис. 2) проявляется в виде фазового сдвига в динамике системы взаимодействия океан–атмосфера–материки,

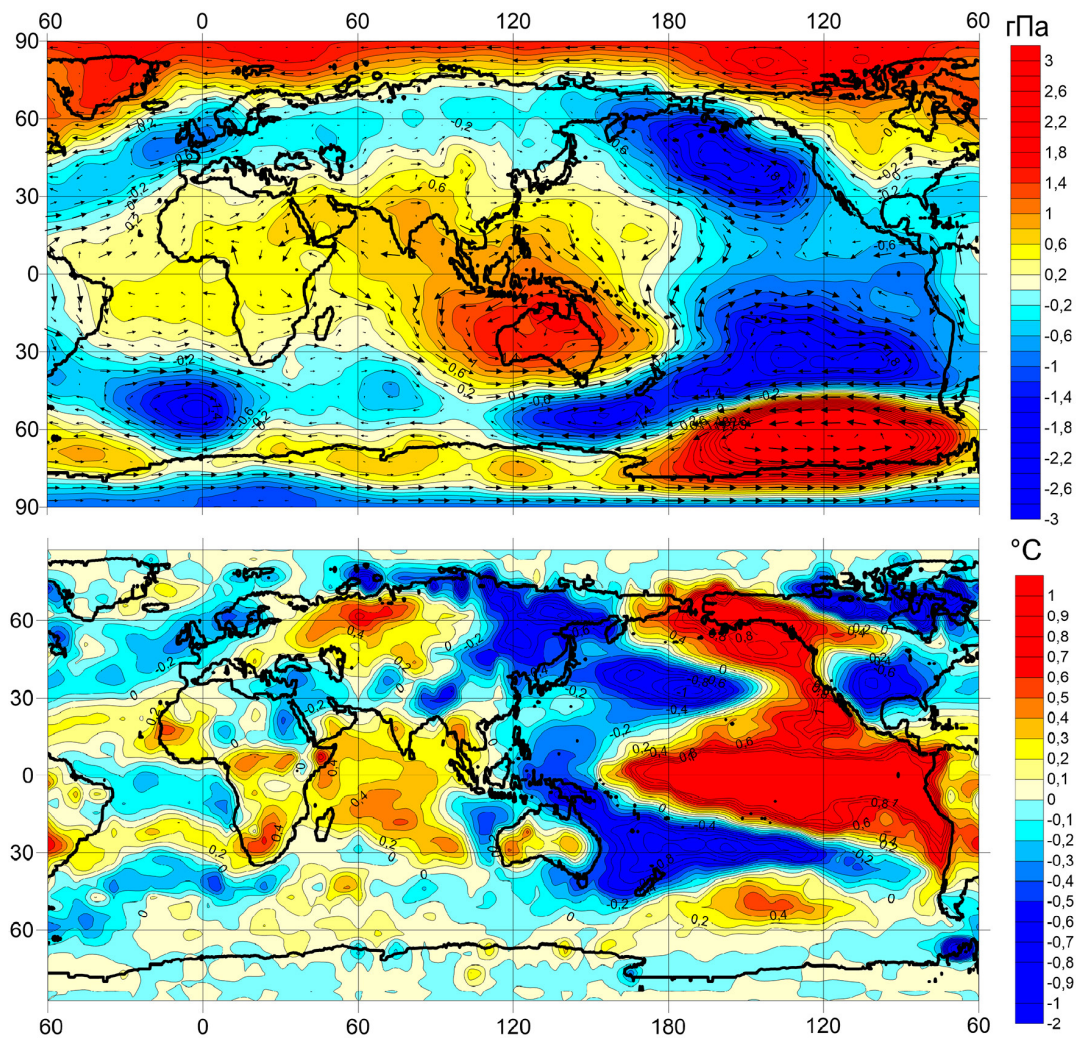


Рис. 1. Термобарическая структура межгодовой ГАО в период 1950–1999 гг. Осредненные поля атмосферного давления (верху) на уровне моря (соответствующее поле геострофического ветра показано стрелками) и приповерхностной температуры воздуха (внизу).

при котором происходит смена климатических сценариев. Как показали наши оценки (Анисимов и др., 2012), этот процесс напрямую связан как с интенсификацией теплоотдачи Мирового океана в атмосферу, что может сопровождаться соответствующим ростом глобального потепления на суше, так и с фазами накопления тепла океаном, сопровождающимися усилением фактора континентальности климата. На основе этих представлений было предложено ввести в научный обиход понятие о междекадной ГАО как ингибиторе глобальной фазовой климатической изменчивости, обнаруживаемой в виде последовательной сменяемости климатических ситуаций или сценариев климата в Северном полушарии (Бышев и др., 2011).

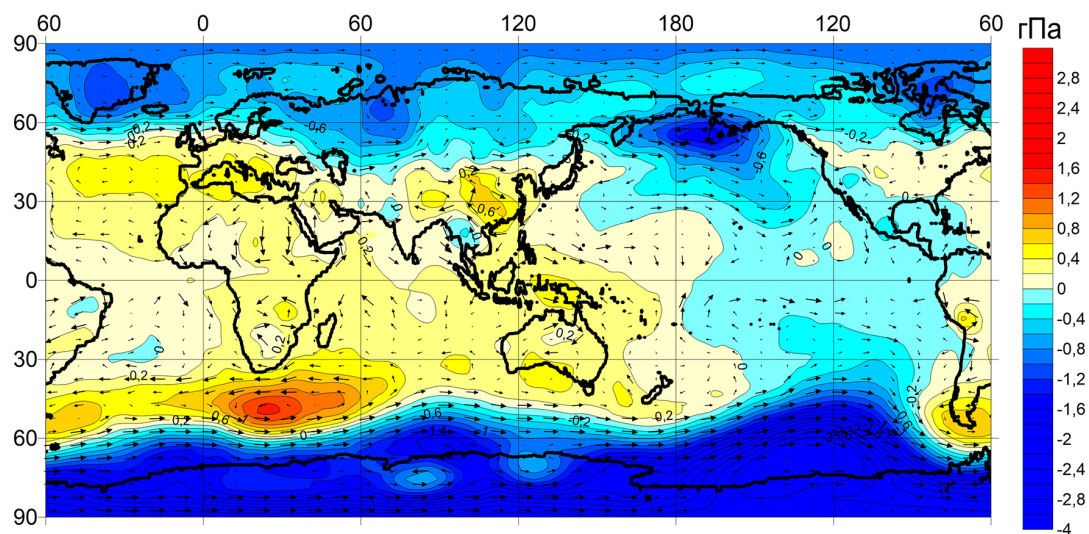


Рис. 2. Барическая структура Глобальной атмосферной осцилляции на междекадном временном масштабе. На рисунке приведены аномалии поля атмосферного давления, возникшие вследствие фазового климатического сдвига в середине 70-х гг. прошлого столетия. Стрелками показано соответствующее аномальное ветровое поле.

Таким образом, климатическая роль каждой из двух мод ГАО определилась в соответствии с их конкретным временным масштабом. В этой связи следует обратить внимание на нетривиальный вывод о том, что относительно более короткопериодная (межгодовая) мода ГАО играет роль спускового механизма для тихоокеанских событий ЭНЮК. Дополнительная контрольная проверка этой рабочей гипотезы убедительно подтвердила ее достоверность, что было показано на примере сравнительного анализа специфической структуры полей глобальных аномалий приповерхностной температуры на разных стадиях рассматриваемых процессов, а также при сопоставлении временных функций индексов ГАО и ЭНЮК, приведенных в (Бышев и др., 2012; Serykh et al., 2019).

Результаты композиционного анализа глобальных полей основных гидрометеорологических характеристик за период их инструментальных наблюдений с 1950 по 2010 гг. (Allan, Ansell, 2006; Brohan, et al., 2006) выявили, что задолго до появления первых признаков известных событий Эль-Ниньо возникает существенная деформация крупномасштабного поля атмосферного давления во всем эквато-

риально-тропическом поясе Земли. Данное атмосферное явление ассоциируется с началом развития очередной фазы межгодовой ГАО (Бышев и др., 2012). Последующее постепенное распространение этой аномалии на восток приводит к подавлению активности планетарной конвекции – важного центра действия глобальной атмосферы. Следствием данного фактора является ослабление северо-восточного и юго-восточного пассатов в Тихом океане, способствующее возникновению здесь западного переноса на экваторе, сопровождающегося появлением очередного Эль-Ниньо. Разнонаправленные зональные градиенты аномалий давления в экваториальной зоне Тихого и Индийского океанов указывают на то, что существующие здесь две смежные ячейки зональной атмосферной циркуляции Уокера (Вебстер, 1988; Вязилова, 2008) с наступлением Эль-Ниньо могут менять свой знак на противоположный. Известно также (Anderson, 1999; Saji et al., 1999; Webster et al., 1999; Бышев и др., 2008), что наблюдаемая в экваториальной зоне Тихого океана ярко выраженная дипольная структура поля ТПО изменяет знак своей полярности в периоды Эль-Ниньо, когда аномалии этой характеристики на противоположных участках указанной зоны также изменяют свои знаки.

Есть основание полагать, что перечисленная выше пространственно-временная последовательность определенных климатических событий может свидетельствовать о непосредственной физической связи явлений ГАО и ЭНЮК. Причем в данном контексте региональные события Эль-Ниньо должны рассматриваться в качестве производной функции или составного элемента в структуре гидрометеорологических аномалий, генерируемых Глобальной атмосферной осцилляцией. Иначе говоря, межгодовая ГАО в определенном смысле является основой атмосферного блока и «главным двигателем» физического механизма генерации событий Эль-Ниньо. Отсюда вытекают важные следствия, связанные с актуальными поисками новых подходов (Serykh et al., 2019) к реальным прогнозам этого крупномасштабного климатического возмущения.

Междекадные осцилляции теплосодержания океана (МОСТОК) и их возможная связь с внутривековой фазовой изменчивостью современного климата

Наиболее значимым фактором короткопериодной изменчивости современного климата принято считать его глобальное потепление, связываемое в большинстве случаев с антропогенной эмиссией продуктов сжигания углеводородного топлива (IPCC, 2013). В то же время на фоне возникшего, по-видимому, по этой причине известного линейного положительного внутривекового тренда средней приповерхностной температуры, судя по регулярно появляющимся со сравнительно недавних пор научным сообщениям (Tsonis, et al., 2007; Wang, et al., 2009), внимание исследователей все больше привлекают признаки существования интенсивных разномасштабных осцилляций в глобальных полях гидрометеорологических характеристик (Stephens et al., 2001; Swanson, Tsonis, 2009; Панин, 2009; Akasofu, 2010). В этих

статьях говорится также о том, что такого рода климатически значимые колебания температуры на значительных пространствах материков и над громадными акваториями океанов на протяжении последнего столетия в определенных случаях находились в противофазе (Бышев и др., 2005; 2006). Данное соотношение термических факторов в водной и воздушной сферах, как определенное следствие крупномасштабного взаимодействия океанов, атмосферы и материков, вполне может быть воспринято в качестве косвенного свидетельства существования реального процесса естественного квазициклического перераспределения тепла в глобальной климатической системе. Действительно, прослеживающиеся на известных энергетических спектрах колебаний приповерхностной температуры статистически значимые всплески на межгодовых и мультидекадных частотах (Бышев и др., 2010) трудно объяснить чем-либо иным, кроме как проявлением естественной изменчивости внутренней динамики климатической системы. При всей кажущейся на первый взгляд хаотичности проявления этой короткопериодной изменчивости при определенном подходе к ее исследованию удается обнаружить признаки существования неслучайных квазидетерминированных фазовых состояний глобального климата. По аналогии с принятой в практике численного моделирования процессов окружающей среды терминологией такие циклически возникающие мультидекадные состояния климатической системы было предложено именовать климатическими сценариями (Бышев и др., 2011; Панин и др., 2015). Обнаружение фазовой структуры изменчивости современного климата дало возможность сделать заключение о том, что на территории Европы и северо-западной Азии, по крайней мере, в течение последних 100 лет выделялись относительно устойчивые эпизоды (по 25–35 лет) усиления и ослабления континентальности климата со всеми вытекающими отсюда последствиями типа колебаний водности рек, экстремальных сезонных температур воздуха и т.п. При этом были приняты во внимание имеющиеся свидетельства того, что на межгодовом временном масштабе ведущая роль в этих процессах, очевидно, принадлежит атмосфере, а на мультидекадном – океану (Монин, 1977; Gulev et al., 2013).

Независимые свидетельства адекватности таких нетривиальных представлений о реальности мультидекадной фазовой структуры изменчивости современного климата можно обнаружить в значительном количестве публикаций зарубежных коллег (Latif, 2001; Lee, McPhaden, 2008; Liman et al., 2010; Nakamura, 2013). Некоторые из таких работ (Minobe, 1999; Ponomarev et al., 2001; Yamasaki, Nanawa, 2002) посвящены так называемому климатическому сдвигу в середине 70-х гг. прошлого столетия, совпадающему, по нашему определению, со сменой очередной фазы климата в Северо-Атлантическом регионе (Бышев и др., 2011). В соответствии с территориальными привязанностями большинства этих исследователей основное внимание в таких работах обращено, главным образом, на Тихоокеанский и Северо-Американский регионы (Minobe, 1997, Levitus et al., 2009; Liman et al., 2010). Весьма показательна в данном отношении работа (Lee, McPhaden, 2008), в которой содержится информация о междукадных климатических фазовых изменениях в Ти-

хоокеанском и Индоокеанском регионах на рубеже XXI столетия, а также исследование (Nakamura, 2013), обратившее внимание на квазисинхронность такого рода климатических изменений в регионах Гренландского и Охотского морей. Все эти и многие другие, им подобные по тематике, работы показали, что реально существующие мультидекадные изменения современного климата имеют характер квазисинхронных возмущений глобального масштаба, по крайней мере, на всем пространстве Северного полушария.

Выяснение природы короткопериодной климатической изменчивости и поиски ее источников неизбежно заставили нас обратиться к Мировому океану как наиболее емкому и активному аккумулятору тепла с обратными связями в составе глобальной климатической системы. Наряду с известным результатом расчетов положительного векового тренда теплосодержания Мирового океана (Levitus et al., 2009; Liman et al., 2010) десять лет назад были опубликованы выявленные, по сути, эмпирическим путем факты наличия очагов выхолаживания ВДС в северных частях Атлантического и Тихого океанов (Бышев и др., 2009) в период 1975–1999 гг., отождествляемый с началом и развитием современного глобального потепления (IPCC, 1995; 2001; 2007; 2013). В качестве весьма убедительного подкрепления этого неординарного результата следует упомянуть независимые данные анализа материалов таких крупных гидрофизических экспериментов, как МЕГАПОЛИГОН (1987 г., Тихий океан) и АТЛАНТЭКС-90 (1990 г., Атлантика), подтвердивших существование интенсивной тепловой разгрузки в некоторых энергоактивных или информативных регионах океанов в последней четверти прошлого столетия (Бышев, Снопков, 1990; Бышев и др., 1992; Бышев и др., 1993). В дополнение к этому, с помощью соответствующих результатов численного моделирования (см. рис. 3) термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики (Мошонкин и др., 2004) удалось еще раз убедиться в том, что в указанный период имело место сокращение теплосодержания ВДС в некоторых ключевых районах этого океана (Анисимов и др., 2012).

В конечном итоге, с помощью численного моделирования эволюции термохалинных характеристик в некоторых информативных регионах Мирового океана (Бышев и др., 2016а) была обнаружена мультидекадная осцилляция его теплосодержания (МОСТОК). Анализ результатов моделирования показал, что по крайней мере в нескольких энергоактивных районах Мирового океана МОСТОК проявляется в виде чередующихся эпизодов аккумуляции тепла и тепловой разгрузки океана продолжительностью 25–35 лет. Вслед за этим были обнаружены убедительные признаки климатической роли ВДС океана в качестве «заряжаемого» аккумулятора с обратной связью в системе его крупномасштабного взаимодействия с атмосферой. Определенный признак такой связи выявлен при сопоставлении временной фазовой структуры МОСТОК с характером мультидекадного чередования сценариев климата в Северо-Атлантическом регионе (Бышев и др., 2011). Далее, на примере ряда конкретных информативных районов Мирового океана, показано, что в период очередной положительной фазы МОСТОК, которая прихлала на 1975–

1999 гг., верхний деятельный слой океана выхолаживался, а поступавшие от него в атмосферу океанское тепло и влага способствовали увлажнению и потеплению климата на континентах. В фазы МОСТОК, когда ВДС океана аккумулировал тепло, по логике событий, климат на материках в целом должен был становиться более континентальным, что собственно и наблюдалось до середины 70-х гг. прошлого века и прослеживается в начале текущего столетия (IPCC, 1995; 2001; 2007; 2013).

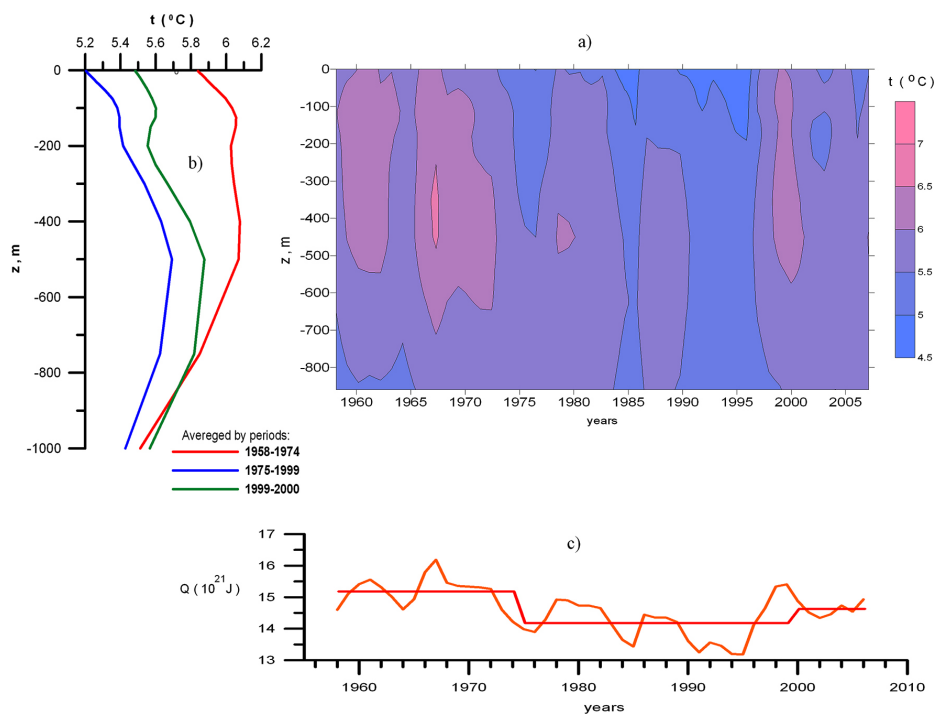


Рис. 3. Эволюция термической структуры верхнего деятельного слоя в Северной Атлантике ($55\text{--}65^\circ\text{с.ш.}$, $40\text{--}30^\circ\text{з.д.}$) в холодную половину года – (а) в период 1958–2006 гг.; вертикальное распределение температуры – (б) в три фазы климата (Бышев и др. 2011); изменение теплосодержания – (с) верхнего 800-метрового слоя в течение периода 1958–2006 гг.

Таким образом, выявленный в ряде наших исследований характер мультидекадной эволюции теплосодержания деятельного слоя океана дает основание полагать, что такого рода чередования фаз аккумуляции и потери тепла в ВДС может сопровождаться сменой знака в направлении тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой. В свою очередь, подобное изменение в системе их крупномасштабного взаимодействия приводит к смене климатических сценариев на континентах (Бышев и др., 2011; Byshev et al., 2017), в чем состоит одна из главных особенностей термодинамического процесса в современной климатической системе Земли.

Заключение

С помощью применения композиционного и статистического методов анализа глобальных полей приповерхностной температуры, атмосферного давления

и ряда других гидрометеорологических параметров, дополненных результатами численного моделирования на основе известных глобальных баз данных прямых наблюдений получены нетривиальные результаты, характеризующие внутреннюю динамику климатической системы. Основное внимание авторов анализируемых публикаций было сосредоточено на изучении межгодовой и междекадной пространственно-временной структуры аномалий термодинамических характеристик Мирового океана и глобальной атмосферы как индикаторов происходящих в современную эпоху сравнительно короткопериодных климатических изменений. Среди анализируемых результатов обращено внимание на впервые обнаруженную в текущем столетии разнонаправленность внутривековых вариаций приповерхностной температуры воздуха в океанических и континентальных регионах. Последующие поиски авторов в данном направлении привели к выявлению крупномасштабных очагов выхолаживания в Северной Атлантике и Северной Пацифике в период 1975–1999 гг., то есть в активную фазу развития глобального потепления на континентах. Совпадение по времени этих двух крупномасштабных природных явлений позволило обосновать и сформулировать гипотезу о существовании и климатической значимости процесса квазипериодического перераспределения тепла в системе взаимодействия океана, атмосферы и материков. Неоценимую поддержку в проверке реальности данного концептуального положения оказали материалы выполненного анализа натурных наблюдений в Мировом океане по программам крупных отечественных гидрофизических экспериментов МЕГАПОЛИГОН и АТЛАНТЭКС-90, активными участниками которых являлись и авторы настоящей работы.

Одним из нескольких имеющих принципиальное значение результатов анализируемых работ является открытие фазовой структуры климатической изменчивости в регионе Северной Атлантики. Известно, что в середине 70-х гг. прошлого столетия в регионах Северной Пацифики и Северной Америки был отмечен так называемый климатический сдвиг, который широко обсуждался в научной печати. Используя эту информацию и обобщив ее в совокупности с соответствующими результатами собственных исследований, авторы пришли к важному выводу о том, что фазовая структура свойственна процессу междекадной эволюции климата в глобальном масштабе.

Дальнейшие исследования изменчивости климатических характеристик океана и атмосферы привели авторов обзора к гипотезе о связи фазовой структуры внутривековой изменчивости климата в Северо-Атлантическом регионе с соответствующим изменением теплосодержания верхнего деятельного слоя океана. Подтверждение данного предположения было получено с помощью анализа результатов численного моделирования эволюции теплосодержания вод Северной Атлантики во 2-й половине XX столетия. В частности, удалось обнаружить, что в период с 1975 г. по 1999 г. верхний 1000-метровый слой океана значительно сократил свое теплосодержание, т.е. имела место его тепловая разгрузка в то время, как до и после этого периода ВДС океана накапливал тепло.

Последующие работы в этом направлении позволили установить, что тепловая разгрузка ВДС в тот же период происходила и в Северной Пацифике, а так-

же в некоторых районах Южного океана. В итоге, диагноз эволюции термической структуры в нескольких информативных регионах Мирового океана дал возможность сформулировать представление о существовании планетарной Междекадной Осцилляции Теплосодержания ОКеана (МОСТОК), в определенной степени влияющей на характер короткопериодной (междекадной) изменчивости современного климата.

К серии новых, сравнительно недавно опубликованных результатов, о которых говорится в настоящем обзоре, относится также авторская гипотеза о глобальных атмосферных осцилляциях (ГАО). Ее основные положения естественным образом следуют из итогов выполненного в рассмотренных работах анализа фазовой изменчивости термодинамических состояний океана и атмосферы, представленной глобальными межгодовой и междекадной атмосферными осцилляциями. К разряду концептуально значимых результатов, упомянутых в настоящем обзоре, относится также вывод о том, что атмосферный блок известного квазициклического явления Эль-Ниньо должен рассматриваться в качестве одного из региональных элементов динамической структуры межгодовой глобальной атмосферной осцилляции.

Литература

- Анисимов М.В., Бышев В.И., Залесный В.Б., Мошонкин С.Н.* Мультидекадная изменчивость термической структуры вод Северной Атлантики и ее климатическая значимость // ДАН. 2012. Т. 443. № 3. С. 372–376.
- Анисимов М.В., Бышев В.И., Залесный В.Б., Нейман В.Г., Сидорова А.Н.* Влияние глобальной атмосферной осцилляции на гидрофизический режим вод Северной Атлантики // ДАН. 2014. Т. 454. № 1. С. 92–96.
- Антонов Д.И.* Современные климатические изменения вертикальной термической структуры северных частей Атлантического и Тихого океанов // Метеорология и гидрология. 1990. № 4. С. 78–87.
- Бышев В.И., Иванов Ю.А., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В., Скляров В.Е., Щербинин А.Д.* О проявлении эффекта Эль-Ниньо в Индийском океане // ДАН. 2008. Т. 418. № 3. С. 391–396.
- Бышев В.И., Кононова Н.К., Нейман В.Г., Романов Ю.А.* Особенности динамики климата Северного полушария в XX столетии // ДАН. 2002. Т. 384. № 4. С. 674–681.
- Бышев В.И., Кононова Н.К., Нейман В.Г., Романов Ю.А.* Количественная оценка параметров климатической изменчивости системы океан-атмосфера // Океанология. 2004. Т. 44. № 3. С. 324–334.
- Бышев В.И., Кооль Л.И., Снопков В.Г.* Энергообмен океана и атмосферы по данным эксперимента «МЕГАПОЛИГОН» // В кн. «Эксперимент МЕГАПОЛИГОН». М.: Наука, 1992. С. 200–222.
- Бышев В.И., Копрова Л.И., Навроцкая С.Е., Позднякова Т.Г., Романов Ю.А.* Аномальное состояние Ньюфаундлендской энегоактивной зоны в 1990 г. // ДАН. 1993. Т. 331. № 6. С. 735–738.
- Бышев В.И., Копрова Л.И., Романов Ю.А.* О формировании Аномалий ТПО в районе Ньюфаундлендской энергоактивной зоны в мае-июне 1990 г. // Метеорология и гидрология. 1996. № 7. С. 78–87.

- Бышев В.И., Нейман В.Г.* Отклик Баренцева моря на события Эль-Ниньо // ДАН. 2000. Т. 373. № 6. С. 826–829.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Позднякова Т.Г., Романов Ю.А.* Новые данные о термодинамическом режиме климатической системы в Северном полушарии // ДАН 2001. Т. 381. № 4. С. 539–544.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Пономарев В.И., Романов Ю.А., Серых И.В., Цурикова Т.В.* Роль Глобальной Атмосферной Осцилляции в формировании климатических аномалий Дальневосточного региона России // ДАН. 2014. Т. 458. № 1. С. 92–96.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А.* Климатические ритмы теплового режима Мирового океана. Природа. 2016а. № 8. С. 26–33.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А.* О разнонаправленности изменений глобального климата на материках и океанах // ДАН. 2005. Т. 400. № 1. С. 98–104.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А.* О существенных различиях крупномасштабных изменений приземной температуры над океанами и материками // Океанология. 2006. Т. 46. № 2. С. 165–177.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В.* Глобальные атмосферные осцилляции в динамике современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 89–94.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В.* Значение и роль Индийского океана в глобальной климатической системе // В кн. Физические, геологические и биологические исследования океанов и морей. М.: Научный мир, 2010. С. 35–47.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В.* О пространственной неоднородности некоторых параметров глобальной изменчивости современного климата // ДАН. 2009. Т. 426. № 4. С. 543–548.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В.* О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики // ДАН. 2011. Т. 438. № 6. С. 817–822.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В.* Эль-Ниньо как следствие глобальной осцилляции в динамике климатической системы Земли // ДАН. 2012. Т. 446. № 1. С. 89–94.
- Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В., Сонечкин Д. М.* О статистической значимости и климатической роли глобальной атмосферной осцилляции // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 179–185.
- Бышев В.И., Серых И.В., Сидорова А.Н., Скляров В.Е., Анисимов М.В.* Океанический фактор мультидекадной изменчивости современного климата и перспективы её мониторинга // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 3. С. 5–19. DOI:10.2.29006/1564-2291.JOR-2018(3).
- 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., Усыченко И.Г.* Тепловое состояние вод в дельте Гольфстрима в мае-июне 1990 г. // ДАН. 1995. Т. 341. № 4. С. 542–544.
- Вебстер П.* Крупномасштабная структура тропической атмосферы. В кн. Крупномасштабные динамические процессы в атмосфере. М., «Мир», 1988, С. 261–905.
- Вязилова Н.А.* Крупномасштабный влагообмен в тропиках Индийского и Тихого океанов в годы с явлением Эль-Ниньо — Южное колебание // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 20–33.
- Глобальный климат / Под ред. Дж. Хотона. Л: Гидрометеиздат, 1987. 502 с.

- Дийкстра Х.* Нелинейная физическая океанография. Применение теории динамических систем к крупномасштабной циркуляции океана и Эль-Ниньо. М.: 2007. 680 с.
- Динамика климата / Под ред. Манабе С. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 575 с.
- Динамика погоды / Под ред. Манабе С. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 421 с.
- Изменение климата / Под ред. Дж. Гриббина. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 360 с.
- Козленко С.С., Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Анализ причинно-следственных связей между Эль-Ниньо в Тихом океане и его аналогом в экваториальной Атлантике. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 754–763
- Кондратьев К.Я.* Глобальный климат. СПб.: Наука, 1992. 359 с.
- Кононова Н.К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
- Монин А.С.* Роль океанов в климатических моделях // В кн. Физические основы теории климата и его моделирования. Л.: Гидрометеоздат, 1977. С. 206–209.
- Монин А.С., Сонечкин Д.М.* Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. М.: Наука, 2005. 191 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А.* История климата. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 408 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.
- Пальмен Э., Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 616 с.
- Панин Г.Н.* Об изменении климата в полярных зонах Земли в XX и XXI столетиях // ДАН. 2009. Т. 427. № 3. С. 397–402.
- Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Соломонова Н.В.* Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 183–210.
- Петросянци М.А., Семёнов Е.К., Гущина Д.Ю., Соколихина Е.В., Соколихина Н.Н.* Циркуляция атмосферы в тропиках: климат и изменчивость. М.: Макс Пресс, 2005. 640 с.
- Современные глобальные изменения природной среды. Т. 4. Факторы глобальных изменений. М.: Научный мир, 2012. 540 с.
- Уоллес Дж., Блэкман М.* Наблюдаемая низкочастотная изменчивость атмосферы. Крупномасштабные динамические процессы в атмосфере. М.: Мир, 1988. С. 66–109.
- Эксперимент МЕГАПОЛИГОН. Гидрофизические исследования в северо-западной части Тихого океана. М.: Наука, 1992. 416 с.
- Akasofu S.-I.* On the recovery from the Little Ice Age // Natural Science. 2010. Vol. 2. No. 11. P. 1211–1224. DOI: 10.4236/ns.2010.211149.
- Allan R.J., Ansell T.J.* A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850–2004 // J. Climate. 2006. Vol. 19. P. 5816–5842.
- Anderson D.* Extremes in the Indian Ocean // Nature. 1999. Vol. 401. P. 337–339.
- Atlas POLYMODE. Woods Hole. USA. 1986. 375 p.
- Blanke B., Neelin J.D., Gutzler D.* Estimating the effect of stochastic wind stress forcing on ENSO irregularity // J.Climate, 1997. Vol. 10. 1473–1486.
- Brohan P., Kennedy J. J., Harris I.S., Tett F. B., Jones P. D.* Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850 // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. P. D12106, DOI:10.1029/2005JD006548.
- Bronnimann S.* Impact of El Niño Southern Oscillation on European climate // Revs. Geophys. 2007. Vol. 45. RG 3003. DOI 10.1029/2006RG0001999.
- Bronnimann S., Sticher A., Griesser T., Fischer A.M., Grant A., Ewen T., Zhou T., Schraner*

- M., Rozanov E., Peter T.* Variability of large-scale atmospheric circulation indices for the Northern hemisphere during the past 100 years // *Meteorol. Zeitschr.* 2009. Vol. 18. No. 4. P. 379–396.
- Byshev 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.
- Chiang J.C.H., Kushnir Yu.* Interdecadal changes in eastern Pacific ITCZ variability and its influence on the Atlantic ITCZ // *Geoph. Res. Lett.* 2000. Vol. 27. No. 22. P. 3687–3690. *Climate Diagnostic Bulletin, Wash. (D. C.), 1989/2006.*
- Ding R., Li J., Tseng Y.* The impact of South Pacific extratropical forcing on ENSO and comparisons with the North Pacific. *Clim. Dyn.* 2015. Vol. 44. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2303-5>.
- Emanuel K.* A simple model of multiple climate regimes // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107. No. D 9. P. ACL 4-1–ACL-4-11.
- Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N., Park W., Koltermann K.P.* North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // *Nature.* 2013. Vol. 499. P. 464–468. DOI: 10.1038/nature 12268.
- Hasselmann K., Frankignoul C.* Stochastic climate models. Part II. Application to sea surface temperature anomalies and thermocline variability // *Tellus.* 1977. Vol. 29. No. 4. P. 289–305.
- IPCC. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change / Eds. Houghton J.T. et al.* N.Y.: Cambridge Univ. Press, 1996. 572 p.
- IPCC. *Climate Change 2001. The Scientific Basis Contribution of WG1 to the YI Assessment Report of the IPCC / Eds. Houghton J.T., Ding Y. et al.* Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001. 892 p.
- IPCC. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to the IV Assessment Report of the IPCC / Eds. Solomon S. et al.* Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
- IPCC. *Climate Change 2013. The Physical Science Basis // In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.* Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
- Latif M.* Tropical Pacific/Atlantic Ocean Interactions at Multi-Decadal Time Scales // *Geoph. Res. Lett.* 2001. Vol. 28. No. 3. P. 539–542.
- 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 // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. P. L01605. DOI: 10.1029/2007 GL032419.
- Lee T., McPhaden M.J.* Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific // *Geophys. Res. Lett.* 2010. Vol. 37. L14603. DOI:10.1029/2010GL044007.
- Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Locarnini R. A. , Garcia H. E.* Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36. P. L07608. DOI: 10.1029/2008 GL037155.
- Liman J.M., Good S.A., Gouretski V.V. et al.* Robust warming of the global upper ocean // *Nature.* Vol. 465. 20 May 2010. DOI:10.1038/nature09043.
- Lorenz E.* Climatic predictability // *The physical basis of climate modelling. GARP Publ. Series.* 1975. No. 16. P. 132–136.

- Lu J., Vecchi G.A., Reichler T.* Expansion of the Hadley cell under global warming // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. P. L06805. DOI: 10.1029/2006GL028443, 2007.
- McPhaden M.J., Busalacchi A.J., Cheney R. et al.* The tropical Ocean Global Atmosphere observing system: A decade of progress // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. No. C7. P. 14169–14240.
- Minobe S.A.* 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America // *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24. P. 683–686.
- Minobe S.A.* Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillation over the North Pacific: role in climatic regime shift // *Geophys. Res. Lett.* 1999. Vol. 26. P. 855–858.
- Mo K.C., Hakkinen S.* Decadal Variations in the Tropical South Atlantic and Linkages to the Pacific // *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28. No. 10. P. 2065–2068.
- Nakamura M.* Greenland Sea Surface Temperature Change and Accompanying Changes in the North Hemispheric Climate // *J. of Climate.* 2013. Vol. 26. P. 8576–8596. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00435.1.
- Neelin J.D., Battisti D.S., Hirst A.S., Jin F.-F., Wakata Y., Yamagata T., Zebiak S.E.* ENSO theory // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. No. C7. P. 14261–14290.
- Ponomarev V.I., Kaplunenko D.D., Ishida H.* Centennial and semisentennial Climatic Tendencies in the Asian continental and Pacific marginal areas // *Bulletin of Japan Sea Research Institute.* 2001. No. 32. P. 7790.
- Power S.B., Smith I.N.* Weakening of the Walker circulation and apparent dominance of El-Niño both reach record levels, but has ENSO really changed // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. P. L18792. DOI: 10.1029/2007GL030854.
- Roemmich D., Gilson J.* The global ocean imprint of ENSO // *Geophys. Res. Lett.* Vol. 2011. Vol. 38. L13606. DOI: 10.1029/2011GL047992.
- Saji N.H., Goswami B.N., Vinayachandran P.N., Yamagata T.* A dipole mode in the tropical Indian Ocean // *Nature.* 1999. Vol. 401. P. 360–363.
- Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A.* Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections // *Pure and Applied Geophysics.* 2019. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02182-8>.
- Stephens C., Levitus S., Antonov J., Boyer T.P.* On the Pacific Ocean regime shift // *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28. No. 19. P. 3721–3724.
- Swanson K.L., Tsonis A.A.* Has the climate recently shifted? // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36. P. L06711. DOI: 10.1029/2008GL037022.
- Terray P.* Southern Hemisphere extra-tropical forcing: a new paradigm for El Niño—Southern Oscillation. *Clim Dyn.* 2011. Vol. 36. P. 2171–2199.
- Tsonis A.A., Swanson K., Kravtsov S.* A new dynamical mechanism for major climate shifts // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. P. L13705. DOI: 10.1029/2007GL030288.
- Wang G., Swanson K.L., Tsonis A.A.* The pacemaker of major climate shifts // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36. P. L07708. DOI: 10.1029/2008GL036874.
- Webster P.J., Moore A.M., Loschnigg J.P., Leben R.R.* Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–98. *Nature.* 1999. Vol. 401. P. 356–360.
- Yamasaki S., Nanawa K.* Regimes shift found in the Northern Hemisphere SST field // *Met. Soc. Japan.* 2002. Vol. 80. No. 1. P. 119–135.

OVERALL ASSESSMENT OF THE STATISTICAL VALUE AND CLIMATE ROLE OF GLOBAL ATMOSPHERIC AND OCEANIC OSCILLATIONS

Romanov Yu. A.¹, Neiman V.G.¹, Byshev V.I.¹, Serykh I.V.¹, Sonechkin D.M.¹,
Sidorova A.N.¹, Gusev A.V.^{1,2}, Kononova N.K.³, Ponomarev V.I.⁴,
Figurkin A.L.⁵, Anisimov M.V.¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovskiy prospect,
Moscow, 117997, Russia, e-mail: vgneiman2007@yandex.ru

² Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, 8 Gubkina St.,
Moscow 119901, Russia. e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com

³ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29, Staromonetny St.,
Moscow, 119017, Russia, e-mail: ninakononova@yandex.ru

⁴ Pacific Oceanological Institution, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 43,
Baltic St., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: pvi711@yandex.ru

⁵ Pacific Fishery Research Centre, 4, Shevchenko St., Vladivostok, 690091 Russia,
e-mail: figurkin@tinro.ru

Submitted 15.02.2019, accepted 30.05.2019

Discovery of the global atmospheric and oceanic oscillations was regarded as an essential addition to the wide range of multi-scale processes characterizing the variability of the global climate system short-term dynamics. Interannual global atmospheric oscillation (GAO) was found during the study of a physical mechanism and indices of the well-known events of El Niño (Byshev et al., 2012.). The first report on the multi-decadal oscillation of the of the ocean upper active layer heat content (MOHO) was published in 2016 (Byshev et al., 2016). Subsequent heat content evolution studies of these intra-century processes in the atmosphere and in the ocean allowed to propose a new realistic approach to improvement a theory and methods of the modern climate variability evaluating (Byshev et al., 2017; Byshev et al., 2018; Serykh et al., 2019). The article provides a brief annotated review of the main publications devoted to the substantiation and analytical description of the basic concepts of short-period variability of the modern climate associated with the global effects of inter-annual atmospheric oscillation (GAO) and multi-decadal oscillation of the ocean upper active layer heat content of the world ocean (MOHO).

Keywords: ocean, atmosphere, climate, temperature, salinity, global atmospheric oscillation, upper active layer, heat content, deep convection

References

- Akasofu S.-I. On the recovery from the Little Ice Age. *Natural Science*, 2010, Vol. 2, No. 11, pp. 1211–1224, doi: 10.4236/ns.2010.211149.
- Allan R.J. and Ansell T.J. A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850–2004. *J. Climate.*, 2006, Vol. 19, pp. 5816–5842.
- Anderson D. Extremes in the Indian Ocean. *Nature*, 1999, Vol. 401, pp. 337–339.
- Anisimov M.V., Byshev V.I., Zalesny V.B., and Moshonkin S.N. Multidekadnaya izmenchivost termicheskoy strukturi vod Severnoy Atlantiki i ee klimaticheskaya znachimost (Multidecadal variability of water thermal structure of Northern Atlantic Ocean and its climatic role). *DAN*, 2012, Vol. 443, No. 3, pp. 372–376.

- Anisimov M.V., Byshev V.I., Zalesny V.B., Neiman V.G., and Sidorova A.N.* Vliyanie globalnoy atmosfernooy oscilliatsii na gidrofizicheskiy rezim vod Severnoy Atlantiki (Influence of global atmosphere oscillation on hydrophysical regime of Northern Atlantic). *DAN*, 2014, Vol. 454, No. 1, pp. 92–96.
- Antonov D.I.* Sovremennye klimaticheskiye izmeneniya vertikalnoy termicheskoy strukturi severnih chastey Atlanticheskogo i Tihogo okeanov (Climatic variations of vertical thermal structure in the northern parts of Atlantic and Pacific Oceans). *Meteorologiya and Hydrologiya*, 1990, No. 4, p. 78–87.
- Atlas POLYMODE. Woods Hole, USA, 1986, 375 p.
- Blanke B., Neelin J.D., and Gutzler D.* Estimating the effect of stochastic wind stress forcing on ENSO irregularity. *J. Climate*, 1997, Vol. 10, 1473–1486.
- Brohan P., Kennedy J.J., Harris I.S., Tett F.B., and Jones P.D.* Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *J. Geophys. Res.*, 2006, Vol. 111, D12106, doi: 10.1029/2005JD006548.
- Bronnimann S.* Impact of El Niño Southern Oscillation on European climate. *Revs. Geophys.*, 2007, Vol. 45, RG 3003, doi: 10.1029/2006RG0001999.
- Bronnimann S., Sticher A., Griesser T., Fischer A.M., Grant A., Ewen T., Zhou T., Schraner M., Rozanov E., and Peter T.* Variability of large-scale atmospheric circulation indices for the Northern hemisphere during the past 100 years. *Meteorol. Zeitschr.*, 2009, Vol. 18, No. 4, pp. 379–396.
- Byshev V.I. and Neiman V.G.* Otklik Barentseva moria na sobitiya El Nino (Barentz Sea reply on El Niño events). *DAN*, 2000, Vol. 373, No. 6, pp. 826–829.
- Byshev V.I. and Snopkov V.G.* O formirovani polia temperaturi vodi poverhnosti okeana v energo-aktivnoy zone severo-zapadnoy chasti Tihogo okeana na primere poligona “MEGAPOLYGON” (On formation of surface water temperature field in energy-acting zone of the North-Western Pacific Ocean in case of the “MEGAPOLYGON experiment”). *Meteorologiya i gidrologiya*, 1990, No. 11, pp. 70–77.
- Byshev V.I. and Usychenko I.G.* Teplovoe sostoyanie vod v del’te Gol’fstrima v mae-iyune 1990g. *DAN*, 1995, Vol. 341, No. 4, pp. 542–544.
- Byshev V.I., Ivanov Yu.A., Neiman V.G., Romanov Yu. A., Serykh I.V., Sklyarov V.E., and Shcherbinin A.D.* O proyavlenii efekta El Nino v Indiyском okeane. *DAN*, 2008, Vol. 418, No. 3, pp. 391–396.
- Byshev V.I., Kononova N.K., Neiman V.G., and Romanov Yu.A.* Kolichestvennaya ocenka parametrov klimaticheskoy izmenchivosti sistemi ocean-atmosfera (Qualitative evaluation of ocean-atmosphere system climate change parameters). *Oceanology*, 2004, Vol. 44, No. 3, pp. 324–334.
- Byshev V.I., Kononova N.K., Neiman V.G., and Romanov Yu.A.* Osobennosti dinamiki klimata Severnogo polushariya v XX stoletii (Peculiarities of climate dynamics in Northern hemisphere during XX Century). *DAN*, 2002, Vol. 384, No. 4, pp. 674–681.
- Byshev V.I., Kool L.I., and Snopkov V.G.* Energoobmen okeana i atmosfery po dannim eksperimenta “MEGAPOLYGON” (Energy exchange between ocean and atmosphere on date of “MEGAPOLYGON” experiment), in book «Experiment MTGAPOLYGON», Moscow: Nauka, 1992, pp. 200–222.
- Byshev V.I., Koprova L.I., and Romanov Yu.A.* O formirovani anomaliiy TPO v rayone Njufaulndenskoy energoaktivnoy zoni v mae-iyune 1990 (On formaton SST anomalies in Newfoundland energy-acting zone in May-June 1990). *Meteorologiya i gidrologiya*, 1996, No. 7, pp. 78–87.
- Byshev V.I., Koprova L.I., Navrotskaya S.E., Pozdnyakova T.G., and Romanov Yu.A.* Anomal’noe

- sostoyanie N'yufaundlenskoi enegoaktivnoi zony v 1990g. *DAN*, 1993, Vol. 331, No. 6, pp. 735–738.
- Byshev V.I., Neiman V.G., and Romanov Yu.A.* Klimaticheskie ritmi teplovogo rejima Mirovogo okeana (Climatic rhythms of heat regime of the World Ocean). *Priroda*, 2016, No. 8, pp. 26–33.
- Byshev V.I., Neiman V.G., and Romanov Yu.A.* O raznonapravlenosti izmeneniy globalnogo klimata na materikah i okeanah (On different signs of climate change on lands and oceans). *DAN*, 2005, Vol. 400, No. 1, pp. 98–104.
- 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., Ponomarev V.I., Romanov Yu.A., Serykh I.V., and Tsurikova T.V.* Rol Globalnoy Atmosfernoy Oscillyatsii v formirovaniy klimaticheskikh anomalii Dalnevostochnogo regiona Rossii (A role of the Global Atmosphere Oscillation in forming the climatic anomalies in Russian Far Eastern region). *DAN*, 2014, Vol. 458, No. 1, pp. 92–96.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Pozdnyakova T.G., and Romanov Yu.A.* Novie dannie o termodinamicheskom rejime klimaticheskoy sistemi v Severnom polusharii (New date on thermal-dynamical regime of climatic system in the Northern hemisphere). *DAN*, 2001, Vol. 381, No. 4, pp. 539–544.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A.* On the essential differences between the large-scale variations of the surface temperature over the oceans and continents. *Oceanology*, 2006, Vol. 46, No. 2, pp. 147–158.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V.* El Nino kak sledstvie globalnoy atmosfernoy oscilliatsii v dinamike klimaticheskoy sistemi Zemli (El Nino as the sequence of the global atmosphere oscillation in dynamics of the Earth climatic system). *DAN*, 2012, Vol. 446, No. 1, pp. 89–94.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V.* Globalnie atmosfernie oscilliatsii v dinamike sovremennogo klimata (Global atmosphere oscillations in dynamics of the recent climate). *Sovremennye problemi distancionnogo zondirovaniya Zemli iz cosmos*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 89–94.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V.* O fazovoy izmenchivosti nekotorykh harakteristik sovremennogo klimata v regione Severnoy Atlantiki (On the phasal change of some characteristics of the recent climate in the Northern Atlantic Ocean). *DAN*, 2011, Vol. 438, No. 6, pp. 817–822.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V.* O prostranstvennoy neodnorodnosti nekotorykh parametrov globalnoy izmenchivosti sovremennogo klimata (On a spatial nonuniformity of the recent climate global change). *DAN*, 2009, Vol. 426, No. 4, pp. 543–548.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V.* Znachenie i rol Indiyaskogo okeana v globalnoy klimaticheskoy sisteme (Part and role of the Indian Ocean in the global climatic system). In book: *Fizicheskie, geologicheskie i biologicheskie issledovaniya okeanov i morey*, Moscow: Nauchniy mir, 2010, pp. 35–47.
- Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V., and Sonechkin D. M.* O statisticheskoi znachimosti i klimaticheskoi roli global'noi atmosfernoi ostsillyatsii (Statistical and Climatological Significance of the Global Atmospheric Oscillation). *Okeanologiya*, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 179–185.
- Byshev V.I., Serykh I.V., Sidorova A.N., Sklyarov V.E., and Anisimov M.V.* Okeanicheskiy factor

- multidekadnoy izmenchivosti sovremennogo klimata i perspektivi ee monitoringa (Oceanic factor of the recent climate multi-decadal change and perspective of its monitoring). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2018, Vol. 46, No. 3, pp. 5–19, doi: 10.2.29006/1564-2291.JOR-2018(3).
- Chiang J.C.H., and Kushnir Yu. Interdecadal changes in eastern Pacific ITCZ variability and its influence on the Atlantic ITCZ. *Geoph. Res. Lett.*, 2000, Vol. 27, No. 22, P. 3687–3690. Climate Diagnostic Bulletin, Wash. (D. C.), 1989/2006.
- Dijkstra X. Nelineynaya fizicheskaya okeanografiya. Primenenie teorii dinamicheskikh system k krupnomasshtabnoy cirkuliacii okeana i El Nino (Non-linear physical oceanography. Application of dynamic system theory to ocean large-scale circulation and El Niño). Moscow: 2007, 680 p.
- Ding R., Li J., and Tseng Y. The impact of South Pacific extratropical forcing on ENSO and comparisons with the North Pacific. *Clim. Dyn.*, 2015, Vol. 44, 2017 p. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2303-5>.
- Eksperiment MEGAPOLIGON . Gidrofizicheskie issledovaniya v severo-zapadnoy chasti Tihogo okeana (Hydophysical study of North-western part of the Pacific Ocean). Moscow: Nauka, 1992, 416 p.
- Emanuel K.A simple model of multiple climate regimes. *J. Geophys. Res.*, 2002, Vol. 107, No. D 9, pp. ACL 4-1–ACL-4-11.
- Gribbin J. (red.) *Izmenenie klimata (Climate change)*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980, 360 p.
- Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N., Park W., and Koltermann K.P. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales. *Nature*, 2013, Vol. 499, pp. 464–468, doi: 10.1038/nature 12268.
- Hasselmann K. and Frankignoul C. Stochastic climate models. Part II. Application to sea surface temperature anomalies and thermocline variability. *Tellus*, 1977, Vol. 29, No. 4, pp. 289–305.
- Hoton J (red.) *Globalniy klimat (Global climate)*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 502 p.
- IPCC. Climate Change 1995. The Science of Climate Change, Eds. Houghton J.T. et al. N.Y., USA: Cambridge University Press, 1996, 572 p.
- IPCC. Climate Change 2001. The Scientific Basis Contribution of WG1 to the YI Assessment Report of the IPCC / Eds. Houghton J.T., Ding Y. et al. UK and New York Cambridge, N.Y., USA: Cambridge University Press, 2001, 892 p.
- IPCC. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to the IV Assessment Report of the IPCC, Eds. Solomon S. et al. UK and New York Cambridge, N.Y., USA: Cambridge University Press, 2007, 996 p.
- IPCC. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. UK and New York Cambridge, N.Y., USA: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
- Kondrat'ev K.Y. *Globalniy klimat (Global climate)*. St. Petersburg: Nauka, 1992, 359 p.
- Kononova N.K. Klassifikatsiya cirkulatsionnih mehanizmov severnogo polushariya po B.L. Dzerdzhevskomu (Classification of circulation mechanisms of Northern Hemisphere by B.L. Dzerdzhevskiy). Moscow: Voentehinizdat, 2009, 372 p.
- Kozlenko S.S., Mokhov I.I., and Smirnov D.A. Analiz prichinno-sledstvennih svyazey mezdu El Nino v Tihom okeane i ego analogom v ekvatorialnoy Atlantike (Analysis of interrelations between El Niño in Pacific ocean and its analog in equatorial Atlantic). *Izv. RAN, ser. FAO*, 2009, Vol. 45, No. 6, pp. 754–763.
- Latif M. Tropical Pacific/Atlantic Ocean Interactions at Multi-Decadal Time Scales. *Geoph. Res. Lett.*, 2001, Vol. 28, No. 3, pp. 539–542.

- 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 *Geophys. Res. Lett.*, 2008, Vol. 35, pp. L01605, doi: 10.1029/2007 GL032419.
- Lee T. and McPhaden M.J. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, Vol. 37, pp. L14603, doi:10.1029/2010GL044007.
- Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Locarnini R.A., and Garcia H.E. Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, Vol. 36, pp. L07608, doi: 10.1029/2008 GL037155.
- Liman J.M., Good S.A., Gouretski V.V., et al. Robust warming of the global upper ocean. *Nature*, Vol. 465, 20 May 2010, doi: 10.1038/nature09043.
- Lorenz E. Climatic predictability. The physical basis of climate modelling. *GARP Publ. Series*, 1975, No. 16, pp. 132–136.
- Lu J., Vecchi G.A., and Reichler T. Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geoph. Res. Lett.*, 2007, Vol. 34, pp. L06805, doi: 10.1029/2006GL028443.
- Manabe S.L. (red.) *Dinamika klimata (Climate dynamics)*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 575 p.
- Manabe S.L. (red.) *Dinamika pogodi (Weather dynamics)*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 421 p.
- McPhaden M.J., Busalacchi A.J., Cheney R. et al. The tropical Ocean Global Atmosphere observing system: A decade of progress. *J. Geophys. Res.*, 1998, Vol. 103, No. C7, pp. 14169–14240.
- Minobe S.A. 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, Vol. 24, pp. 683–686.
- Minobe S.A. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillation over the North Pacific: role in climatic regime shift. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, Vol. 26, pp. 855–858.
- Mo K.C. and Hakkinen S. Decadal Variations in the Tropical South Atlantic and Linkages to the Pacific. *Geoph. Res. Lett.*, 2001, Vol. 28, No. 10, pp. 2065–2068.
- Monin A.S. and Shishkov Yu.A. *Istoria klimata (Climate history)*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 408 p.
- Monin A.S. and Sonechkin D.M. *Kolebaniya klimata po dannim nabludeniya : troynoy solnechniy i drugie cikli (Climate change by date of observations : triple sunny and other cycles)*. Moscow: Nauka, 2005, 191 p.
- Monin A.S. Rol okeanov v klimaticheskikh modelyakh (Role of oceans in climate models) in book: *Fizicheskie osnovi teorii klimata i ego modelirovaniya (Physial principals of climate theory and its modelling)*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, pp. 206–209.
- Moshonkin S.N., Dianskiy N.A., Eidinov D.A., and Bagno A.V. Model cirkuliacii Severnoy Atlantiki i Severnogo Ledovitogo okeana (Circulation model of the Northern Atlantic Ocean and Arctic Ocean). *Okeanologiya*, 2004, Vol. 44, No. 6, pp. 811–825.
- Nakamura M. Greenland Sea Surface Temperature Change and Accompanying Changes in the North Hemispheric Climate. *Jour. of Climate*, 2013, Vol. 26, pp. 8576–8596, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00435.1.
- Neelin J.D., Battisti D.S., Hirst A.S., Jin F.-F., Wakata Y., Yamagata T., and Zebiak S.E. ENSO theory. *J. Geophys. Res.*, 1998. Vol. 103, No. C7, pp. 14261–14290.
- Palmen E. and Njuton Ch. *Circulacionnie sistemi atmosfery (Circulation systems of atmosphere)*. Leningrad: Gidrometeizdat, 1973, 616 c.
- Panin G.N. Ob izmenenii klimata v poliarnih zonah Zemli v XX i XXI stoletiyah (On climate change in the Earth's polar zones in XX and XXI centuries. *DAN*, 2009, Vol. 427, No. 3, pp. 397–402.

- Panin G.N., Viruchalkina T.Yu., and Solomonova N.V. Klimaticheskie izmeneniya v Arktike, Severnoy Atlantike, rayone Kaspiya i ih vzaimosviaz (Climatic change in Arctic, Northern Atlantic and Caspian area and its inter-connection). *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*, 2015, No. 1, pp. 183–210.
- Petrosiants M.A., Semenov E.K., Guschina L.Yu., Sokolihina E.V., and Sokolihina N.N. Cirkuliaciya atmosfery v tropikah: klimat i izmenchivost (Circulation of atmosphere in tropics: climate and its change). Moscow: Maks Press, 2005, 640 p.
- Ponomarev V.I., Kaplunenko D.D., and Ishida H. Centennial and semisentennial Climatic Tendencies in the Asian continental and Pacific marginal areas. *Bulletin of Japan Sea Research Institute*, 2001, No. 32, pp. 7790.
- Power S.B. and Smith I.N. Weakening of the Walker circulation and apparent dominance of El Niño both reach record levels, but has ENSO really changed. *Geoph. Res. Lett.*, 2007, Vol. 34, pp. L18792, doi: 10.1029/2007GL030854.
- Roemmich D., Gilson J. The global ocean imprint of ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, Vol. 38, pp. L13606, doi: 10.1029/2011GL047992.
- Saji N.H., Goswami B.N., Vinayachandran P.N., and Yamagata T. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, Vol. 401, pp. 360–363.
- Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02182-8>
- Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredi. T. 4. Faktori globalnykh izmeneniy (Recent global change in environments. The factors of the global change). Moscow: Nauchnyy mir, 2012, 540 p.
- Stephens C., Levitus S., Antonov J., and Boyer T.P. On the Pacific Ocean regime shift. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, Vol. 28, No. 19, pp. 3721–3724.
- Swanson K.L. and Tsonis A.A. Has the climate recently shifted? *Geophys. Res. Lett.*, 2009, Vol. 36, pp. L06711, doi: 10.1029/2008 GL037022.
- Terray P. Southern Hemisphere extra-tropical forcing: a new paradigm for El Niño–Southern Oscillation. *Clim Dyn.*, 2011, Vol. 36, pp. 2171–2199.
- Tsonis A.A., Swanson K., and Kravtsov S. A new dynamical mechanism for major climate shifts. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, Vol. 34, pp. L13705, doi: 10.1029/2007 GL030288.
- Viazilova N.A. Krupnomasshtabnyy vlogoobmen v tropikah Indiyanskogo i Tihogo okeanov v godi s yavleniem El Niño – Juznoe kolebanie (Large-scale moisture exchange in tropics of Indian and Pacific oceans in the years with ENSO). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2008, No. 2, pp. 20–33.
- Walles J. and Blackman M. Nabludaemaya nizkochastotnaya izmenchivost atmosfery. Krupnomasshtabnye dinamicheskie processy v atmosfere (Observed low-frequency change of atmosphere. Large-scale dynamical processes in atmosphere). Moscow: Mir, 1988, pp. 66–109.
- Wang G., Swanson K.L., and Tsonis A.A. The pacemaker of major climate shifts. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, Vol. 36, pp. L07708, doi: 10.1029/2008 GL036874.
- Webster P.J., Krupnomasshtabnaya struktura tropicheskoy atmosfery (Large-scale structure of tropical atmosphere). Moscow: Mir, 1988, pp. 261–905.
- Webster P.J., Moore A.M., Loschnigg J.P., and Leben R.R. Coupled ocean atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–98. *Nature*, 1999, Vol. 401, pp. 356–360.
- Yamazaki S. and Nanawa K. Regimes shift found in the Northern Hemisphere SST field. *Met. Soc. Japan*, 2002, Vol. 80, No. 1, pp. 119–135.