

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОХАЛИННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

д-р физ.-мат. наук Л.А. ТИМОХОВ¹, д-р геогр. наук И.Е. ФРОЛОВ¹,
д-р Х. КАССЕНС², ст. науч. сотр. В.Ю.КАРПИЙ¹, ст. науч. сотр. Н.В.ЛЕБЕДЕВ¹,
инж. С.Ю. МАЛИНОВСКИЙ¹, д-р физ.-мат. наук И.В. ПОЛЯКОВ³,
д-р Е. ХЕЛЕМАНН⁴

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: ltim@aari.nw.ru

² — Институт морских наук (GEOMAR), Германия, e-mail: hkassens@geomar.de

³ — International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska, USA, e-mail: igor-pc@iarc.uaf.edu

⁴ — Институт морских и полярных исследований им. Альфреда Вегенера (AWI), Германия, e-mail: Jens.Hoelmann@awi.de

Обширные архивы данных наблюдений использованы для анализа изменений солёности, температуры и толщины верхнего, атлантического и донного слоев в 1950–1993, 2007–2013 гг. в Евразийском и Амеразийском суббассейнах Северного Ледовитого океана (СЛО). Мульти-регрессионные модели выявили механизмы сопряженности характеристик слоев. Выявлена оппозиция вариации толщин атлантического слоя, с одной стороны, и верхнего и донного слоев, с другой, а также зависимость, в которой за повышением температуры атлантических вод следует увеличение солёности поверхностного слоя с запаздыванием в 4 года. Высокая корреляция между температурой и солёностью верхнего и атлантического слоев СЛО с индексами климатической изменчивости (например, с индексом Североатлантического колебания) свидетельствует о связанности процессов в Арктике и низких широтах. Установлена роль внешних гидрометеорологических воздействий в климатических изменениях состояния СЛО. Полученная статистическая малопараметрическая модель описывает функционирование макромасштабных составляющих Трансполярной системы СЛО, что является важным вкладом в понимание арктической климатической системы.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, верхний слой, атлантический слой, донный слой, Трансполярная система Северного Ледовитого океана, сопряженность межгодовых изменений средних характеристик слоев, малопараметрическая модель Трансполярной системы.

ВВЕДЕНИЕ

Значительные изменения в природной среде Арктики, которые произошли в последнее десятилетие, выдвигают исследования Северного Ледовитого океана в одно из приоритетных направлений. По инициативе научных учреждений России (ААНИИ) и Германии (АВИ, ИФМ-ГЕОМАР) в рамках Соглашения между Россией и Германией в области морских и полярных исследований был сформулирован и

с 2013 г. начал выполняться совместный проект «Трансполярная система Северного Ледовитого океана». Основной задачей российско-германского научно-исследовательского проекта было определено исследование изменений трансполярной системы СЛО под влиянием внутренних и внешних факторов, установление обратных связей с элементами климатической системы Арктики для развития методов гидрометеорологических прогнозов и расчетов, а также оценка последствий для экосистемы СЛО.

Трансполярная система Северного Ледовитого океана, включающая в себя крупномасштабные термохалинные структуры (поверхностные арктические воды, шельфовые воды, воды атлантического и тихоокеанского происхождения, донные воды) и динамические структуры (трансарктический дрейф, антициклонический круговорот, циркуляция атлантических и донных вод), а также ледяной покров, является главной частью СЛО.

Исследования по российско-германскому проекту включали три главные области Северного Ледовитого океана, названные кластерами. Кластер «Море Лаптевых» охватывал регион моря Лаптевых и прилегающие районы Сибири. Эта область является важным источником морского льда и пресной воды, источником минеральных и органических веществ. Кластер «Арктический бассейн» включает центральную часть Арктического бассейна (котловины Макарова, Амундсена и Нансена) и напрямую соединяет моря сибирского шельфа и пролив Фрама друг с другом трансарктическим течением и вдоль склоновым потоком атлантических вод. Пролив Фрама, включенный в кластер «Пролив Фрама», является главным связующим звеном между Арктическим бассейном и Атлантическим океаном. Экспедиционные исследования проводились в море Лаптевых, проливе Фрама и частично в Евразийском суббассейне. Анализ климатических и палеоклиматических данных выполнялся для всего СЛО.

В данной статье приводятся результаты исследования межгодовой изменчивости крупномасштабных характеристик Арктического бассейна, полученные в рамках выполнения российско-германского проекта и плановой тематики ААНИИ. Вначале описывается процедура расчета средних термохалинных характеристик для Евразийского суббассейна и Амеразийского суббассейна. Затем приводятся результаты анализа сопряженности изменений параметров различных слоев внутри Трансполярной системы. В конце обсуждаются причины изменений крупномасштабных характеристик Арктического бассейна и приводятся оценки вклада различных климатических индексов в дисперсию межгодовых вариаций температуры, солёности и толщины слоев.

ВЫБОР МАКРОМАСШТАБНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТОЯНИЯ АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА И БАЗА ДАННЫХ

Интегральный эффект суммирования процессов различного масштаба, например, внешнего воздействия и реакции на него океана, проявляется в изменчивости обобщенных показателей состояния СЛО в целом или в отдельных его частях. Адекватность выводов о характере долгопериодных колебаний состояния СЛО и их причинах во многом зависит от дифференцирования морской системы на репрезентативные подсистемы и от выбора репрезентативных характеристик и параметров. В работе (Никифоров, Шпайхер, 1980), а затем в монографии (Никифоров, 2006) показано, что основной особенностью строения водных масс СЛО является их существование в виде устойчивых «естественных гидрологических слоев». Каждый естественный

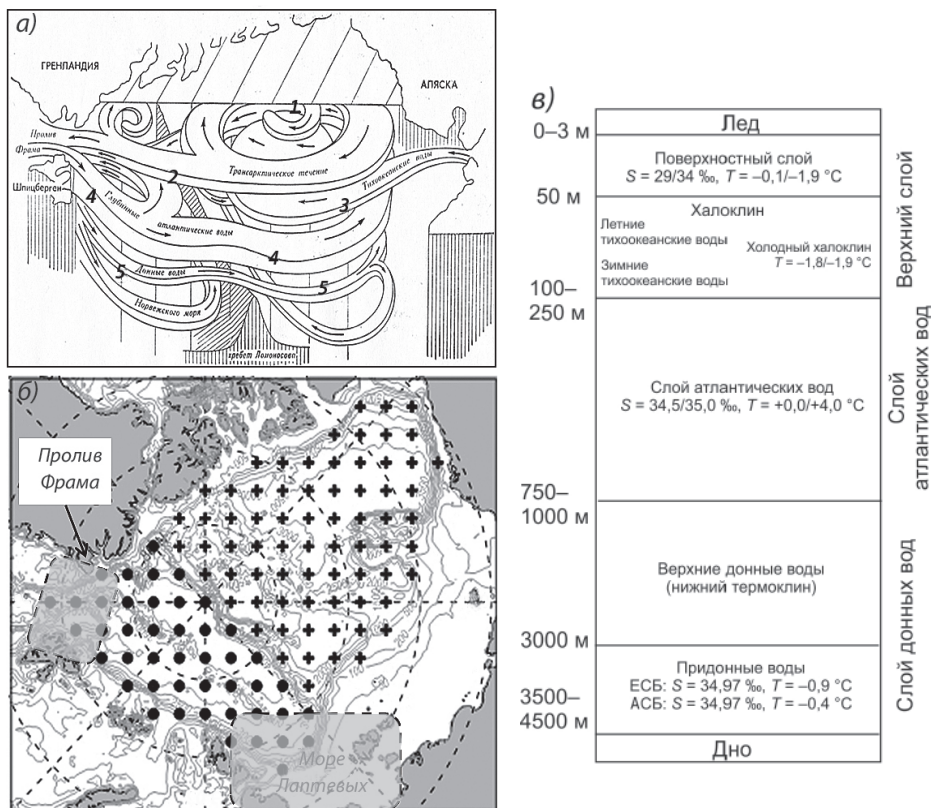


Рис. 1. Блок-схема циркуляции вод Арктического бассейна по Е.Г. Никифорову и А.О. Шпайхеру (1980) (а); положение узлов сетки 200×200 км: узлы, помеченные кружками, относятся к Евразийскому суббассейну (ЕСБ), а помеченные крестиками — к Амеразийскому суббассейну (АСБ); выделенные пунктирными линиями области указывают область кластеров «Море Лаптевых» и «Пролив Фрама», кластер «Арктический бассейн» включает область, помеченную узлами сетки (б); схема вертикального распределения водных масс и естественных слоев (в). Цифрами на фрагменте (а) обозначены элементы циркуляции и водные массы: 1 — антициклонический круговорот поверхностной циркуляции с центром в Канадской котловине; 2 — трансарктическое течение на поверхности океана, распространяющееся от северной части Чукотского моря на востоке до пролива Фрама на западе; 3 — воды тихоокеанского происхождения, располагающиеся под поверхностным слоем; 4 — атлантические воды, поступающие в Арктический бассейн через пролив Фрама под верхним слоем океана; 5 — донные воды, частично поступающие из Гренландского моря и частично образующиеся на шельфе арктических морей.

слой состоит из генетически однородных вод, и в пределах слоев совершаются их макромасштабные движения (рис. 1). Учитывая особенности термохалинной структуры СЛО, основное внимание в данной статье было сосредоточено на анализе межгодовых колебаний интегральных характеристик трех главных слоев океана: верхнего слоя, слоя вод атлантического происхождения и донного слоя.

Верхний слой толщиной 100–250 м включает поверхностный наиболее распределенный слой, зимние и летние тихоокеанские воды и шельфовые воды; при этом его нижняя граница совпадает с верхней границей атлантических вод. Слой атлантической

водной массы, с теплыми (температура $T > 0$ °C) и солеными (соленость $S > 34,5$ ‰) водами атлантического происхождения толщиной 550–700 м, располагается непосредственно под верхним слоем. Донный слой соленых и холодных вод занимает объем океана от нижней границы атлантических вод до дна, и толщина его в зависимости от рельефа дна меняется в пределах 1500–2500 м.

Заметим, что при классификации водных масс нередко выделяют самостоятельную структурную зону в нижней части верхнего слоя — верхний термоклин, а в верхней части донного слоя — нижний термоклин, или верхние донные воды.

Гидрологический режим и термохалинная структура СЛО различаются в Евразийском и Амеразийском суббассейнах (Никифоров, Шпайхер, 1985). Поэтому нами были выделены две макромасштабные области — Евразийский суббассейн (ЕСБ) и Амеразийский суббассейн (АСБ), и исследования изменений термохалинного состояния вод проводились для каждого суббассейна.

Для расчета параметров естественных слоев была использована база данных по температуре и солености в зимний период в узлах регулярной сетки 200×200 км. Эта база была получена на основе данных наблюдений воздушных высокоширотных экспедиций «Север», дрейфующих станций «Северный полюс» и данных зарубежных экспедиций за время с 1950 по 1993 гг. и 2007–2013 гг. (Фролов и др., 2005; Тимохов и др., 2012). Процедура получения гридированных полей и оценки точности гридирования и реконструкции описаны в российско-американском Атласе СЛО (Joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean, 1997, 1998) и в статье (Покровский, Тимохов, 2002). Для периода 1994–2006 гг. поля не были рассчитаны в силу малочисленности данных наблюдений, и процедура реконструкции полей для случаев ограниченного числа данных требует развития и проверки.

По гридированным полям температуры и солености были рассчитаны средние величины температуры, солености и толщины слоев в каждой ячейке сетки. Затем полученные значения были усреднены для акваторий Евразийского и Амеразийского суббассейнов. В результате были получены временные ряды за период 1950–1993, 2007–2013 гг. следующих параметров верхнего, атлантического и донного слоев: усредненные для Евразийского и Амеразийского бассейнов значения толщины слоя соответственно $H_{\text{ЕСБ}}$ и $H_{\text{АСБ}}$ в м, средней по толщине слоя температуре $T_{\text{ЕСБ}}$ и $T_{\text{АСБ}}$ в °C и солености $S_{\text{ЕСБ}}$ и $S_{\text{АСБ}}$ в промилле (‰). Эти характеристики, по аналогии с климатическими индексами Северо-Атлантическое колебание, САК (или в английской транскрипции North Atlantic Oscillation, NAO), Арктическое колебание, АК (Arctic Oscillation, AO), могут быть также названы климатическими индексами СЛО. На рис. 2 представлены кривые межгодовой изменчивости климатических индексов СЛО. На основе полученных данных были вычислены также статистические характеристики временных серий характеристик естественных слоев.

МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕСТЕСТВЕННЫХ СЛОЕВ

Характер изменений характеристик естественных слоев имел следующие особенности. В верхнем слое (рис. 2а) Евразийского суббассейна в 80-х гг. прошлого столетия соленость стала увеличиваться, а в период 2007–2013 гг. соленость колебалась на уровне 90-х. В изменениях толщины верхнего слоя отмечается отрицательный тренд в 1950–1960-х годах, увеличение толщины слоя с середины 1960-х до середины 1970-х и затем наступление тенденции уменьшения толщины слоя, при этом в последние годы ее величины были меньше ранее наблюдавшихся величин

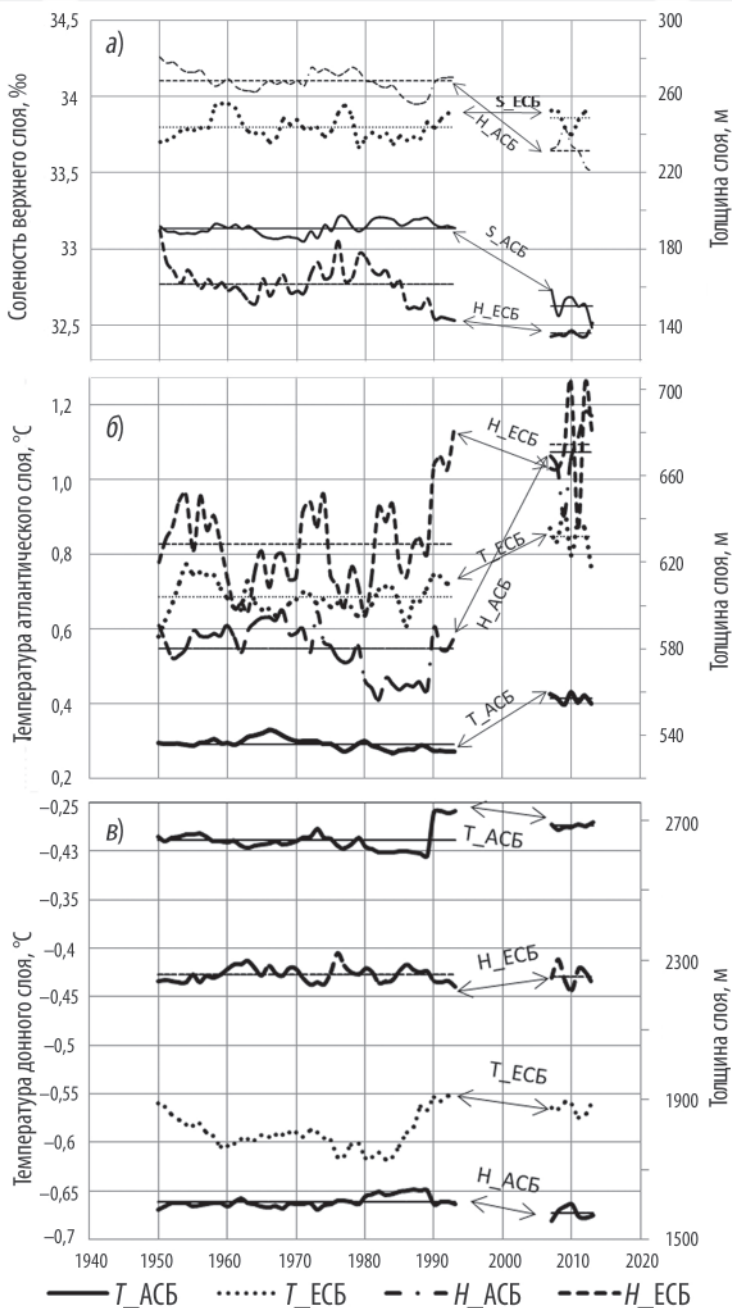


Рис. 2. Межгодовая изменчивость солености (S) верхнего слоя (а), температуры (T) и толщины (H) атлантического (б) и донного (в) слоев в Евразийском (ЕСБ) и Американо-Евразийском (АСБ) суббассейнах.

(Timokhov et al., 2012). В Амеразийском суббассейне тренд солености до 1980-х гг. был положительным, но малым по величине, а начиная с 1990-х соленость в верхнем слое значительно уменьшилась (Timokhov et al., 2012). Толщина верхнего слоя в АСБ до 1990-х гг. имела небольшую тенденцию к уменьшению, а с начала 1990-х толщина слоя аномально уменьшилась. Кривые изменения температуры верхнего слоя близко повторяют изменения солености и в статье не приводятся.

В атлантическом слое (рис. 2б) Евразийского суббассейна температура понижалась с начала 50-х, но с конца 80-х – начала 90-х гг. прошлого века температура вод атлантического происхождения стала повышаться. Повышение температуры атлантических вод вдоль материкового склона от пролива Фрама до моря Лаптевых было отмечено в 1989–1993 гг. (Quadfasel et al., 1991). На нашем графике (рис. 2б) рост температуры начинается с 1986–1987 гг. Это не противоречит результатам указанной статьи, поскольку на рисунке приведена средняя температура для всей акватории Евразийского суббассейна, а в статье (Quadfasel et al., 1991) приводятся данные об изменениях температуры в северной части моря Лаптевых. В последние годы температура атлантических вод в ЕСБ была выше таковой, наблюдавшейся во второй половине прошлого столетия (Polyakov et al., 2005; Timokhov et al., 2012). Толщина атлантического слоя варьировала в больших пределах в 1950–1970-х гг., и затем наступила тенденция увеличения толщины слоя, но со значительными межгодовыми вариациями. Наибольшие изменения произошли в атлантическом слое АСБ. Температура воды, которая в 1970–1980-х гг. слабо понижалась, увеличилась к 2007–2013 гг. до величин, ранее не наблюдавшихся в этом регионе. Аналогично вела себя толщина слоя атлантических вод.

В донном слое также отмечены изменения характеристик слоя. Температура воды в Евразийском суббассейне понижалась до середины 80-х гг. прошлого столетия, и это похолодание донных вод, как отмечалось и в монографии (Никифоров, Шпайхер, 1980), происходило одновременно с похолоданием вод атлантического слоя. Затем произошло значительное потепление донных вод к началу 1990-х гг., сменившееся слабым похолоданием. Температура донных вод в Амеразийском суббассейне слабо понижалась от начала 1950-х, затем резко повысилась на рубеже 1980–1990-х гг. и стала незначительно понижаться к началу текущего столетия. В изменениях толщины донного слоя в ЕСБ наблюдались разномасштабные вариации около нулевого линейного тренда. В АСБ толщина слоя медленно увеличивалась до конца 80-х гг., а затем стала уменьшаться.

Отмеченные нами особенности межгодовых колебаний осредненных характеристик естественных слоев суббассейнов СЛЮ частично сообщались в научных публикациях, но в обобщенном виде приводятся впервые. Далее акцентируем внимание на изменении характеристик от периода 1950–1993 гг. к периоду 2007–2013 гг. Нами были рассчитаны средние значения характеристик естественных слоев для Евразийского и Амеразийского суббассейнов и их среднеквадратические отклонения (СКО) для периодов 1950–1993 гг. (первый период) и 2007–2013 гг. (второй период). Результаты расчетов сведены в табл. 1.

По данным расчетов в табл. 1 видно, что в Амеразийском суббассейне произошло значительное распреснение верхнего слоя и разность между средними величинами солености второго и первого периода более чем в десять раз превосходит СКО для первого периода. Толщина верхнего слоя уменьшилась, и амплитуда изменения

Средние значения солености, температуры, толщины естественных слоев для Евразийского (ЕСБ) и Амеразийского (АСБ) суббассейнов и их среднеквадратические отклонения (СКО) для периодов 1950–1993 и 2007–2013 гг.

Слой		Соленость, ‰		Температура, °С		Толщина слоя, м	
		АСБ	ЕСБ	АСБ	ЕСБ	АСБ	ЕСБ
Верхний 1950–1993	Среднее	33,137	33,797	–1,136	–1,249	268,46	161,54
	СКО	0,045	0,077	0,024	0,030	5,66	10,26
Верхний 2007–2013	Среднее	32,627	33,861	–1,106	–1,256	231,41	135,75
	СКО	0,082	0,065	0,0136	0,0483	7,68	2,53
Атлантический 1950–1993	Среднее	34,847	34,879	0,293	0,685	580,12	628,58
	СКО	0,014	0,018	0,015	0,042	11,22	20,52
Атлантический 2007–2013	Среднее	34,810	34,868	0,414	0,850	671,01	674,47
	СКО	0,014	0,0136	0,013	0,053	16,34	23,87
Донный 1950–1993	Среднее	34,926	34,933	–0,289	–0,589	1609,36	2258,98
	СКО	0,010	0,017	0,011	0,018	15,67	21,63
Донный 2007–2013	Среднее	34,919	34,915	–0,274	–0,564	1576,24	2252,58
	СКО	0,003	0,005	0,003	0,007	17,00	29,88

в 6,5 раз превосходит СКО толщины верхнего слоя в 1950–1993 гг. В Евразийском суббассейне произошло осолонение верхнего слоя, но амплитуда изменения сравнима с СКО первого периода (табл. 1).

Особенно большие изменения произошли в тепловом состоянии СЛО. В слое вод атлантического происхождения в Евразийском суббассейне амплитуда повышения осредненной температуры от первого периода ко второму превзошла СКО интервала 1950–1993 гг. почти в 4 раза, а в Амеразийском суббассейне — в 8 раз. Толщина атлантического слоя Евразийского суббассейна увеличилась на 90 м, что превосходит СКО первого периода в 8 раз. В Амеразийском суббассейне также произошло увеличение толщины атлантических вод, но отношение амплитуды изменения к СКО несколько меньше — 2,3 раза.

Изменения состояния произошли и в глубоких слоях океана. Температура слоя донных вод в обоих суббассейнах повысилась, и амплитуда изменения превысила СКО первого периода. Отношения амплитуды изменения к СКО в Евразийском и Амеразийском суббассейнах составили около 1,4.

Выполненное сравнение и полученные оценки отношения амплитуд изменений к СКО для периода 1950–1993 гг. позволяют сделать вывод об аномальном изменении состояния СЛО от периода 1950–1993 гг. к периоду 2007–2013 гг.

СОПРЯЖЕННОСТЬ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЕСТЕСТВЕННЫХ СЛОЕВ

Анализ сопряженности колебаний характеристик был выполнен с помощью кросс-корреляционного анализа по данным непрерывного ряда 1950–1993 гг. В результате исследования были установлены следующие особенности сопряженности вариаций параметров естественных слоев.

Верхний и атлантический слои. В Евразийском суббассейне соленость верхнего слоя слабо коррелирует в оппозиции с толщиной слоя, и корреляционная связь отсутствует между соленостью и температурой, а также между соленостью верхнего и атлантического слоев (кросс-корреляционные функции не приводятся). Но вариации

солёности верхнего слоя и температуры нижележащего слоя атлантических вод сопряжены синхронно с положительным знаком, а также отмечается значимая корреляция с опережением изменений температуры атлантических вод на 4 года. Т.е. за повышением температуры атлантических вод следует увеличение солёности поверхностного слоя.

Иная сопряженность океанографических характеристик наблюдается в Амеразийском суббассейне. В этом регионе существует прямая корреляционная связь между солёностью и толщиной верхнего слоя, и изменение солёности верхнего слоя сопряжено с колебаниями солёности атлантического слоя с положительным коэффициентом $r = +0,72$. В отличие от Евразийского суббассейна в Амеразийском суббассейне наблюдается отрицательная корреляция между толщиной верхнего слоя и температурой атлантических вод. При этом температура и толщина атлантического слоя сопряжены синхронно с коэффициентом корреляции $r = +0,95$ (кросс-корреляционная функция не приводится). А толщина верхнего слоя изменяется асинхронно с толщиной атлантического слоя подобно тому, что наблюдается в ЕСБ.

Атлантический и донный слой. Из кросс-корреляционного анализа сопряженность характеристик глубинных слоев Евразийского суббассейна выглядит следующим образом. Температура атлантических вод коррелирует с толщиной атлантического слоя с опережением на один год и коэффициентом корреляции $r = +0,72$, а изменения солёности в атлантическом слое опережают межгодовые вариации температуры на 6–9 лет с отрицательным коэффициентом корреляции $r = -0,48... -0,50$. Т.е. уменьшение солёности сопровождается через 6–9 лет повышением температуры, а через год происходит увеличение толщины атлантического слоя в ЕСБ.

В противоположность атлантическому слою, в донном слое температура коррелирует с толщиной с отрицательным коэффициентом корреляции $r = -0,44$, а изменения солёности, подобно атлантическому слою, опережают межгодовые вариации температуры на 6–9 лет с отрицательным коэффициентом корреляции $r = -0,48... -0,50$. Т.е. уменьшение солёности сопровождается через 6–9 лет повышением температуры и увеличением толщины донного слоя в ЕСБ.

В Амеразийском суббассейне, как и в ЕСБ, температура атлантических вод коррелирует с толщиной атлантического слоя с коэффициентом корреляции $r = +0,95$, но изменения солёности в атлантическом слое происходят практически синхронно с межгодовыми вариациями температуры с отрицательным коэффициентом корреляции $r = -0,62$.

В донном слое АСБ, так же как и в ЕСБ, наблюдается отрицательная корреляция между температурой и толщиной слоя, а изменения солёности практически не связаны с межгодовыми вариациями температуры донного слоя.

Отметим особенность межгодовых вариаций толщин слоев. Из рис. 3а, где приведены кросс-корреляционные функции толщин слоев в Евразийском и Амеразийском суббассейнах, следует, что толщины верхнего и донного слоев флуктуируют в оппозиции к изменениям толщины атлантического слоя с коэффициентом корреляции $r = -0,63... -0,86$.

Нами были вычислены средние толщины верхнего, атлантического и донного слоев (см. табл. 1) для периодов 1950–1993 гг. и 2007–2013 гг. По данным таблицы были проведены расчеты изменений толщин от периода к периоду последовательно для верхнего, атлантического и донного слоев: в Евразийском суббассейне $[-26, +45, 0]$ м и в Амеразийском — $[-37, +90, -33]$ м. Из оценок следует, что (а) изменения толщины верхнего и донного слоев в обоих суббассейнах происходили асинхронно

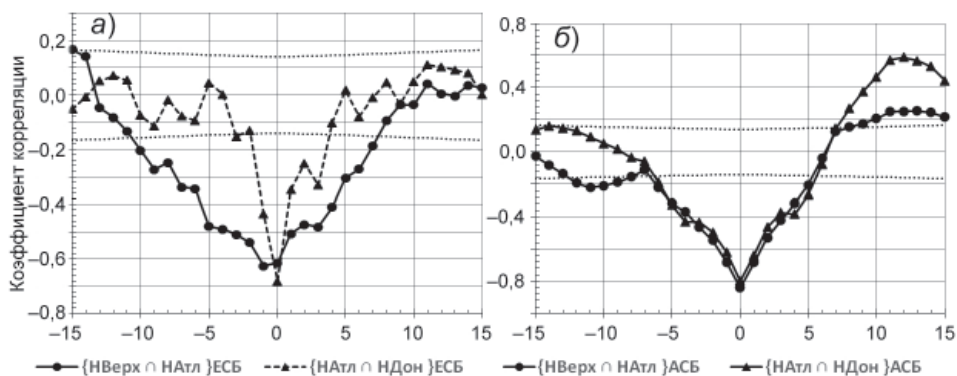


Рис. 3. Кросс-корреляционные функции связи: *a* — толщины верхнего и атлантического слоев $\{N\text{Верх} \cap N\text{Атл}\}$ ЕСБ и толщины атлантического и донного слоев $\{N\text{Атл} \cap N\text{Дон}\}$ ЕСБ для Евразийского суббассейна; *б* — толщины верхнего и атлантического слоев $\{N\text{Верх} \cap N\text{Атл}\}$ АСБ и толщины атлантического и донного слоев $\{N\text{Атл} \cap N\text{Дон}\}$ АСБ для Амеразийского суббассейна. Нижняя шкала обозначает временной сдвиг (годы).

с изменениями толщины атлантических вод, и (*б*) сумма изменений в слоях Евразийского суббассейна оказалась равной +19 м, а в Амеразийском — +20 м.

Выполненный анализ демонстрирует тесную сопряженность изменений характеристик как верхнего и атлантического слоев, так и донного слоя. А оппозиция синхронных вариаций толщин верхнего и донного слоев флуктуациям толщины слоя вод атлантического происхождения позволяет предположить, что на климатическом масштабе толщины слоев приходят в квазистатическое равновесие.

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА МЕЖГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ, СОЛЕННОСТИ И ТОЛЩИНЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ СЛОЕВ

Изменчивость характеристик СЛО складывается в результате воздействия внешних факторов и действия внутренних процессов. Главными внешними по отношению к океану факторами являются процессы взаимодействия его с Атлантическим океаном через Северо-Европейский бассейн и проливы островов Канадского архипелага и Тихим океаном через Берингов пролив, а также взаимодействие с полярной атмосферой и поступление пресных вод с материковым стоком. На флуктуации солености верхнего слоя влияют фазовые переходы вода–лед. Напомним, что в верхнем слое соленость вносит основной вклад в изменения плотности воды и, следовательно, в изменения бароклинной циркуляции вод.

Влияние факторов на формирование состояния СЛО меняется на различных масштабах времени. Так, синоптическая изменчивость океана, прежде всего поверхностного слоя, формируется преимущественно под воздействием атмосферных синоптических процессов. В сезонной изменчивости океана увеличивается вклад материкового стока, таяния и образования ледяного покрова, а также сезонной изменчивости поступления в СЛО тихоокеанских вод и вод атлантического происхождения и стока арктических вод в Северную Атлантику.

Для определения вклада различных факторов в межгодовую изменчивость температуры, солености и толщины естественных слоев нами был использован метод мультирегрессионного анализа. В качестве предикторов были выбраны индексы атмосферной циркуляции, индекс теплового состояния Северной Атлантики, расход

тихоокеанских вод через Берингов пролив, речной сток и летняя площадь льдов в арктических морях. В результате статистических испытаний связей с различными гидрометеорологическими факторами находились уравнения линейной множественной корреляции $y_i = \sum a_{ij} x_{ij} + b_i$, где y_i — характеристики естественных слоев; x_{ij} — наиболее значимые гидрометеорологические параметры, a_{ij} — коэффициенты пропорциональности, b_i — постоянная для каждого из пяти линейных уравнений. Одновременно с получением коэффициентов пропорциональности рассчитывались общий r_i и частные r_{ij} коэффициенты корреляции, а также производилась оценка значимости регрессии путем расчета F -критерия. Ниже приводятся статистические уравнения линейной связи солёности верхнего слоя $S_{\text{верх}}^{\text{ЕСБ}}$, $S_{\text{верх}}^{\text{АСБ}}$ и температуры атлантического слоя $T_{\text{Атл}}^{\text{ЕСБ}}$, $T_{\text{Атл}}^{\text{АСБ}}$ Евразийского и Амеразийского суббассейнов с внешними и внутренними факторами со сдвигом минус один год (–1) или более:

$$S_{\text{верх}}^{\text{ЕСБ}} = 0,45T_{\text{Атл}}^{\text{ЕСБ}}(-4) - 0,00009R_{\text{КЛ}}(-6) - 0,00034R_{\text{ВЧ}}(-6) + 0,0544AO(-1) + 0,23Q_{\text{Бер}}(-4) - 0,00017NAO(-2) + 33,83; \quad (1)$$

$$S_{\text{верх}}^{\text{АСБ}} = -0,320dTa_{\text{июль-сент}}(-1) - 0,42Q_{\text{Бер}}(-1) - 0,00020R_{\text{ВЧ}}(-3) + 0,045Ice_{\text{Вост}}(-2) + 0,0726NAO(-1) + 33,51; \quad (2)$$

$$T_{\text{Атл}}^{\text{ЕСБ}} = 0,228dTa_{\text{июль-сент}}(-1) + 0,124AMO(-4) + 0,071AO_{\text{июль-сент}}(-1) - 0,026NAO(-1) + 0,68; \quad (3)$$

$$T_{\text{Атл}}^{\text{АСБ}} = 0,168dTa_{\text{июль-сент}}(-1) + 0,067AMO(-12) - 0,014NAO(-1) + 0,28. \quad (4)$$

В уравнения вошли следующее наиболее значимые факторы.

Атмосферные индексы: $dTa_{\text{июль-сент}}$ — средняя за летние месяцы июль–сентябрь предыдущего года аномалия приземной температуры воздуха в северной полярной области по данным (Векгуаев, Polyakov, Alexeev, 2010), дополненным до 2013 г.; AO — среднегодовой индекс Арктического колебания (Arctic Oscillation, AO, данные из http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml); $AO_{\text{июль-сент}}$ — индекс Арктического колебания, осредненный за три месяца июль–сентябрь; NAO — среднегодовой индекс Северо-Атлантического колебания (North Atlantic Oscillation, NAO, данные из <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>).

Влияние Северной Атлантики и Тихого океана: AMO — среднегодовой индекс Атлантического многолетнего колебания (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO, данные из <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>), являющийся показателем теплового состояния Северной Атлантики; среднегодовой расход тихоокеанских вод через Берингов пролив $Q_{\text{Бер}}$ (средний годовой расход тихоокеанских вод через Берингов пролив взят из статьи (Roach et al., 1995), и ряд проэкстраполирован до 2012 г. с использованием публикации (Woodgate, Stafford, Praha, 2015)).

Гидрологические показатели: $R_{\text{КЛ}}$ и $R_{\text{ВЧ}}$ — годовой сток рек соответственно в Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское, Чукотское моря; данные по речному стоку в арктические моря были взяты из (Joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean, 1997, 1998) и дополнены до 2012 г.; $Ice_{\text{Вост}}$ — ледовитость в августе морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского по данным (Фролов и др., 2007), дополненным последними годами), которая дает представление об объеме пресных вод растаявшего льда в морях; $T_{\text{Атл}}^{\text{ЕСБ}}(-4)$ — температура атлантического слоя Евразийского суббассейна с опережением в 4 года.

По уравнениям (1–4) были рассчитаны значения солёности верхнего слоя и температуры атлантического слоя в Евразийском и Амеразийском суббассейнах и

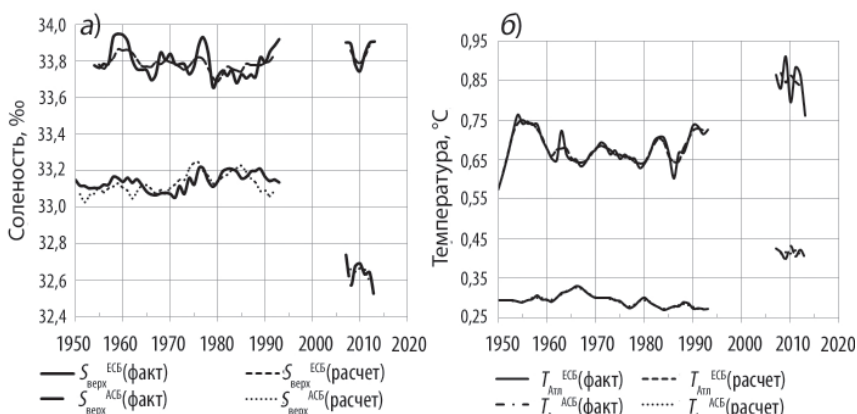


Рис. 4. Фактические (факт) и расчетные средние трехлетние скользящие (расчет) значения солёности верхнего слоя (а) и температуры атлантического слоя (б) в Евразийском и Амеразийском суббассейнах.

произведены трехлетние скользящие осреднения. Фактические и расчетные кривые долгопериодной изменчивости, приведенные на рис 3б, показывают хорошее совпадение. Это свидетельствует о том, что структура полученных уравнений и состав выбранных факторов (предикторов) довольно реалистично отражают долгопериодные изменения средних значений солёности и температуры естественных слоев. Физический смысл каждого предиктора в правой части уравнений следующий.

В Евразийском суббассейне солёность верхнего слоя $S_{\text{верх}}^{\text{ЕСБ}}$ (уравнение 1) увеличивается через четыре года после повышения температуры атлантических вод $T_{\text{Атл}}^{\text{ЕСБ}}(-4)$. В число предикторов входила также температура атлантического слоя без временного сдвига, но при испытании коэффициент корреляции получился меньше уровня значимости. Механизм влияния $T_{\text{Атл}}^{\text{ЕСБ}}$ на солёность обсуждался ранее при анализе кросскорреляционной функции $\{S_{\text{верх}} \cap T_{\text{Атл}}\}^{\text{ЕСБ}}$.

С увеличением стока сибирских рек $R_{\text{КЛ}}, R_{\text{ВЧ}}$ солёность верхнего слоя, как и следовало ожидать, уменьшается через 6 лет. При положительных значениях AO солёность слоя в ЕСБ увеличивается, как это наблюдалось, например, в 2007–2008 гг. Роль $Q_{\text{Бер}}(-4)$ в изменении солёности верхнего слоя менее очевидна. На наш взгляд, механизм влияния таков. Увеличение расхода через Берингов пролив вызывает уменьшение солёности верхнего слоя АСБ (смотри следующее уравнение (2) для $S_{\text{верх}}^{\text{АСБ}}$), что приводит к увеличению аномалии динамической топографии океана в Канадской котловине и интенсификации поверхностного геострофического течения. Интенсификация поверхностной циркуляции усиливает подток атлантических вод через пролив Фрама, способствующий увеличению солёности верхнего слоя ЕСБ.

В Амеразийском суббассейне солёность верхнего слоя $S_{\text{верх}}^{\text{АСБ}}$ (уравнение 2) уменьшается с увеличением летней температуры в предыдущий год $dTa_{\text{июль-сент}}$ (как это наблюдалось в 2008 г. после аномально теплого 2007 г.), с увеличением притока менее солёных (по сравнению с атлантическими водами) тихоокеанских вод через Берингов пролив $Q_{\text{Бер}}(-1)$, а также с увеличением речного стока в моря Восточно-Сибирское и Чукотское. Большая ледовитость восточных арктических морей $Ice_{\text{Вост}}(-2)$ сопутствует малому объёму пресных вод летнего таяния льда и сохранению значительной доли более солёных вод зимнего образования в поверхностном слое. Индекс

NAO коррелирует с отрицательным значением с индексом *AO*, т.е. положительное значение *NAO* отражает преобладание антициклонического режима атмосферной циркуляции в Арктике. Ранее было показано, что при антициклоническом режиме, например в 70–80-х гг. прошлого столетия, наблюдается увеличение солёности в Американо-Северном суббассейне.

Температура вод атлантического происхождения в Арктике зависит от теплового состояния Северной Атлантики (индекс *AMO*), и реакция на изменения *AMO* в слоях ЕСБ и АСБ происходит через 4 и 12 лет соответственно (формулы 3 и 4), прежде всего благодаря адвективно-диффузионным процессам. Влияние атмосферных процессов описывается членами с индексами *AO* и *NAO*. Доминирование циклонического режима атмосферной циркуляции (положительные значения *AO* и отрицательные значения *NAO*) сопряжены с положительной аномалией температуры атлантического слоя (уравнения 3 и 4). Влияние $dT_{\text{июль-сент}}$ на флуктуации температуры атлантических вод в Евразийском суббассейне частично может быть объяснено прямым влиянием атмосферного тепла на атлантические воды Норвежского моря. Но корреляционная связь аномалии летней приземной температуры воздуха с температурой атлантического слоя Американо-Северного суббассейна $\{dT_{\text{июль-сент}}(-1), T_{\text{Атл}}^{\text{АСБ}}\}$ требует пояснения. Прямое воздействие атмосферного потока тепла на атлантический слой исключается, поскольку он экранирован от атмосферы верхним слоем и ледяным покровом. Следовательно, индекс $dT_{\text{июль-сент}}$ воспроизводит влияние тех процессов и факторов, которые не были учтены при подборе предикторов. На масштабность неучтенного эффекта указывает тот факт, что индекс $dT_{\text{июль-сент}}$ синхронно влияет на температуру атлантического слоя как Американо-Северного, так и Евразийского суббассейнов. Одним из возможных механизмов такого опосредованного влияния на атлантический слой могут быть крупномасштабные термобарические волны в атмосфере над Арктикой, эффект которых в определенной степени воспроизводится индексом $dT_{\text{июль-сент}}$. Однако механизм влияния флуктуаций $dT_{\text{июль-сент}}$ на межгодовые колебания температуры атлантических вод в Арктическом бассейне через эффект термобарических волн или другие процессы требует дополнительного исследования.

Полученная малопараметрическая модель, включающая систему уравнений (1–4), является первым уровнем моделирования долгопериодной изменчивости макромасштабных составляющих Трансполярной системы СЛО. Модель позволяет произвести диагностику Трансполярной системы в рамках выбранных параметров $S_{\text{верх}}^{\text{ЕСБ}}, S_{\text{верх}}^{\text{АСБ}}, T_{\text{Атл}}^{\text{ЕСБ}}, T_{\text{Атл}}^{\text{АСБ}}$ и произвести оценки вклада каждого из предикторов в общую дисперсию характеристик естественных слоев.

Нами были рассчитаны дисперсии каждого фактора и по уравнениям (1–4) произведены оценки вклада каждого фактора в общую дисперсию исследуемых параметров. Результаты расчетов и общий коэффициент корреляции для солёности верхнего слоя, температуры атлантического слоя Евразийского и Американо-Северного суббассейнов сведены в табл. 2.

Наименьший общий коэффициент корреляции получился для солёности верхнего слоя ЕСБ, наибольший коэффициент корреляции — для АСБ (последняя колонка табл. 2). Как следует из оценок в табл. 2, влияние Тихого океана ($Q_{\text{Бер}}$) и вод атлантического происхождения Атлантического океана ($T_{\text{Атл}}^{\text{ЕСБ}}, AMO$) на общую дисперсию межгодовой изменчивости солёности верхнего слоя для ЕСБ и АСБ составляют соответственно 17 % и 45 %, речного стока — 40 % и 26 %, атмосферных процессов

Вклад факторов в общую дисперсию характеристик естественных слоев, %

Характеристики	$dTa_{\text{июль-сент}}$	$T_{\text{Атл}}^{\text{ЕСБ}}$	$АМО$	$Q_{\text{Бер}}$	$Ice_{\text{Вост}}$	$R_{\text{КЛ}}$	$R_{\text{Вч}}$	NAO	AO	$AO_{\text{июль-сент}}$	r
$S_{\text{верх}}^{\text{ЕСБ}}$	–	(–4) 9 %	–	(–4) 8 %	–	(–6) 10 %	(–6) 30 %	(–2) 37 %	(–1) 7 %	–	0,72
$S_{\text{верх}}^{\text{АСБ}}$	(–1) 25%	–	–	(–1) 20 %	(–2) 18 %	–	(–3) 26 %	(–1) 11 %	–	–	0,90
$T_{\text{Атл}}^{\text{ЕСБ}}$	(–1) 57%	–	(–4) 17 %	–	–	–	–	(–1) 7 %	–	(–1) 19%	0,82
$T_{\text{Атл}}^{\text{АСБ}}$	(–1) 55%	–	(–12) 13 %	–	–	–	–	(–1) 32 %	–	–	0,85

Примечание. Цифры в скобках указывают опережение фактора в годах.

(AO , NAO) — 44 % и 11 %. Относительно малый вклад атмосферных процессов в межгодовую изменчивость солёности верхнего слоя неудивителен. Исследование межгодовых вариаций солёности воды в зимний период в слое 5–50 м Арктического бассейна показало, что общая дисперсия изменчивости солёности за период 1950–1993 гг. определялась воздействием синхронных процессов и атмосферных процессов предыдущего года на 34 % (Тимохов и др., 2012). Поскольку верхний слой в 3–5 раза толще поверхностного слоя, то в силу инерции его реакция на атмосферные процессы должна быть меньше, что нами и получено.

Температура атлантического слоя в ЕСБ и АСБ зависит от теплового состояния Северной Атлантики ($АМО$) соответственно на 17 и 13 %, от влияния атмосферных процессов (AO , NAO) на 44 и 16 %. Наибольший вклад, более 50 %, в колебания температуры атлантических вод вносит индекс $dTa_{\text{июль-сент}}$ (–1).

Таким образом, полученная на основе данных измерений статистическая модель (1–4) позволила впервые получить количественные оценки вклада различных факторов в дисперсию межгодовых изменений макромасштабных характеристик Трансполярной системы на климатическом периоде 1950–1993, 2007–2013 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интегральные характеристики естественных слоев, рассчитанные на основе данных прямых измерений с применением методов интерполяции (Покровский, Тимохов, 2002), позволяют составить представление о характере долгопериодных изменений макромасштабных составляющих Трансполярной системы Северного Ледовитого океана. Анализ временных серий индексов СЛО позволил выделить характерные особенности их межгодовых колебаний, установить ряд эмпирических закономерностей крупномасштабных изменений Евразийского и Амеразийского суббассейнов, о которых частично сообщалось в научных публикациях, но которые в обобщенном виде публикуются впервые.

В структуре колебаний индексов СЛО на протяжении периода 1950–2013 гг. наблюдались и флуктуации с периодом от 3 до 25 лет, и линейные тренды. При этом колебания характеристик зафиксированы не только в верхнем и атлантическом слоях, но, что важно подчеркнуть, и в донном слое. Главное же климатическое событие в эволюции состояния СЛО произошло на рубеже XX и XXI вв. Величины большинства океанографических характеристик в период 2007–2013 гг. настолько значительно отличались от таковых, наблюдавшихся во второй половине XX в., что происшедшие

изменения следует отнести к главному феномену поведения Трансполярной системы Северного Ледовитого океана. Можно предположить, что переход состояния СЛО от 1950–1993 гг. к фазе 2007–2012 гг. не был линейным.

В изменениях индексов СЛО установлены синхронная и асинхронная сопряженность, и в ряде случаев с определенным временным лагом. Большинство закономерностей сопряжения колебаний характеристик естественных слоев объяснимо с точки зрения физических процессов, и в статье приведено объяснение большинства механизмов, приводящих к формированию наблюдаемой статистической структуры сопряженности флуктуаций исследуемых характеристик. Но в отдельных случаях механизм сопряжения не очевиден. Для менее понятных видов сопряженности приведены гипотезы, которые могут оказаться инструментом раскрытия физических причинно-следственных связей, формирующих неочевидные формы связей исследуемых характеристик.

Установлен важный эмпирический факт, а именно, синхронные изменения толщин естественных слоев и оппозиция вариации толщины атлантического слоя к таковым верхнего и донного слоев, и этот факт еще нуждается в дополнительном анализе. Такая структура сопряжения может наблюдаться при квазистатистическом режиме состояния океана. Но тогда встает вопрос, на каком временном и пространственном масштабах могут реализоваться такие условия в СЛО, который остается открытым. Как и вопрос о существовании других условий и процессов, в результате действия которых формируется установленная нами статистическая закономерность сопряженности толщин естественных слоев.

Метод мультирегрессионного анализа позволил выбрать наиболее значимые факторы, влияющие на межгодовую изменчивость средних значений солености верхнего слоя и температуры атлантического слоя Евразийского и Амеразийского суббассейнов. Полученная система статистических уравнений позволила впервые выполнить количественные оценки вклада факторов в дисперсию межгодовой изменчивости средней солености верхнего слоя и температуры атлантического слоя. Механизм влияния большинства факторов на климатические вариации исследуемых параметров объясним. Но корреляционная связь колебаний температуры атлантических вод в Арктическом бассейне с аномалиями приземной летней температуры воздуха в предыдущий год еще требует дополнительной расшивки.

Система разработанных статистических уравнений (1–4) обретает смысл малопараметрической модели, которая дает описание функционирования макромасштабных составляющих Трансполярной системы СЛО, открывает свойства внутреннего механизма формирования сопряженности характеристик слоев, а также устанавливает роль внешних гидрометеорологических воздействий в климатических изменениях состояния СЛО. В связи с быстрыми изменениями климата Арктики и современными экстремальными процессами в океане развитие теории гидрологического режима и создание методов оценок и прогноза долгопериодных изменений состояния Трансполярной системы Северного Ледовитого океана становится самой актуальной задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 269 с.

Никифоров Е.Г. Стеродинамическая система Северного Ледовитого океана. СПб.: ААНИИ, 2006. 174 с.

Покровский О.М., Тимохов Л.А. Реконструкция зимних полей температуры и солёности Северного Ледовитого океана // *Океанология*. 2002. Т. 42. № 6. С. 822–830.

Тимохов Л.А., Чернявская Е.А., Никифоров Е.Г., Поляков И.В., Карпий В.Ю. Статистическая модель межгодовой изменчивости полей зимней солёности поверхностного слоя в Арктическом бассейне // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. № 1 (90). С. 89–102.

Фролов И.Е., Гудкович З.М., Радионов В.Ф., Тимохов Л.А., Широчков А.В. Научные исследования в Арктике. Т. 1. Научно-исследовательские дрейфующие станции «Северный полюс». СПб.: Наука, 2005. 267 с.

Joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean, Oceanography Atlas for the Winter (1997) and Summer Period (1998). Ed. by L. Timokhov, F. Tanis. Environmental Working Group, University of Colorado, Boulder, CD-ROM.

Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fahrbach E., Frolov I.E., Gerdes R., Hansen E., Holfort J., Ivanov V., Jonson M., Karcher M., Kauker F., Morison J., Orvik K., Schauer U., Smmons H., Skagseth O., Sokolov V., Steel M., Timokhov L., Walsh D., Walsh J.E. One more step toward a warmer Arctic // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. P. 1–4. L17605. doi:10.1029/2005GL0237402005.

Quadfase D.A., Sy A., Wells D., Tunik A. Warming in the Arctic // *Nature*. 1991. 350, 385. doi:10.1038/350385a0

Roach A.T., Aagaard K., Pease C.H., Salo S.A., Weigartner T., Pavlov V.K., Kulakov M.Yu. Direct measurements of transport and properties through the Bering Strait // *Journal of Geophysical Research*. 1995. Vol. 100. № C9. P. 18443–18457.

Timokhov L., Ashik I., Dmitrenko I., Hoelemann J., Kassens H., Kirillov S., Polyakov I., Sokolov V. Extreme changes of the Arctic Ocean during and after IPY 2007/2008 // *Polarforschug*. 2011. Vol. 81 (2). P. 85–102.

Woodgate R.A., Stafford K.M., Praha F.G. A synthesis of year-round interdisciplinary mooring measurements in the Bering Strait (1990–2014) and the RUSALCA years (2004–2011) // *Oceanography*. 2015. Vol. 28. P. 46–67. doi:10.5670/oceanog.2015.57, 2015.

L.A. TIMOKHOV, I.E. FROLOV, H. KASSENS, V.YU. KARPIY, N.V. LEBEDEV,
S.Yu. MALINOVSKY, I.V. POLYAKOV, J. HOELEMANN

CHANGES OF TERMOHALINE CHARACTERISTICS OF TRANSPOLAR SYSTEM OF THE ARCTIC OCEAN

Extensive archives of observations have been used to analyze changes of water salinity, temperature and thickness of the upper, Atlantic and bottom layers in the Eurasian and Amerasian basins of the Arctic Ocean (AO) in 1950–1993 and 2007–2013. Multivariate models revealed the mechanisms of the coherency of the layer properties. An opposition of variations of thicknesses of the Atlantic layer from one side and the upper and bottom layers from the other side was established; it was also shown that the increase of temperature of the Atlantic layer is followed by salinification of the upper layer with a 4 year lag. Strong correlation of temperature and salinity of the upper and Atlantic layers with climatic indexes (like the North Atlantic Oscillation index) suggests the connection between processes in the Arctic and lower latitude regions. The role of external hydrometeorological forcings in climatic changes of the AO state was revealed. The statistical multivariable model is capable of describing large-scale components of the Transpolar system of the AO which is an important contribution for understanding of the Arctic climate system.

Keywords: Arctic Ocean, upper layer, Atlantic layer, bottom layer, Transpolar system of the Arctic Ocean, coherency of interannual changes of mean characteristics of the layers, multivariate model of Transpolar system.