

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА В ПОСЛЕДНЕЕ ДЕСЯТИЛЕТИЕ

канд. геогр. наук И.М. АШИК¹, д-р физ.-мат. наук В.В. ИВАНОВ^{1,2},
д-р Х. КАССЕНС³, рук. лаборатории М.С. МАХОТИН¹,
д-р физ.-мат. наук И.В. ПОЛЯКОВ², д-р физ.-мат. наук Л.А. ТИМОХОВ¹,
д-р геогр. наук И.Е. ФРОЛОВ¹, д-р Е. ХЁЛЕМАНН^{3,4}

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

² — Международный центр исследований Арктики, университет Аляски, Фэрбенкс, Аляска, e-mail: vladimir.ivanov@aari.ru, igor@iarc.uaf.edu

³ — Институт морских наук им. Лейбница при Кильском университете (IFM-GEOMAR), Киль, Германия, e-mail: hkassens@ifm-geomar.de

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

В статье приводится обзор деятельности Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) в области океанологических исследований за последние семь лет. Дается краткое описание экспедиционных работ. Освещаются наиболее важные исследования океанологических процессов, таких как адвекция и трансформация атлантических вод в Евразийском бассейне и прилегающих к нему арктических морей, интрузии и каскадинг на шельфе и континентальном склоне Земли Франца-Иосифа, процессы в придонной части моря Лаптевых. В последнем разделе анализируются межгодовые изменения ключевых характеристик Северного Ледовитого океана (СЛО) последнего десятилетия в сопоставлении с историческим периодом 1948–1993 гг., приводятся новые сведения об изменении уровня арктических морей и динамической топографии океана, термохалинных характеристик СЛО и их сопряженности с изменениями внешних факторов. Высказывается положение, что возврат состояния СЛО к климатическому среднему прошлого века или переход к новому состоянию климатической системы (например, термохалинных полей и циркуляции океана, макроструктуры и дрейфа ледяного покрова) будет зависеть от тенденций изменения глобального климата.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, океанологические исследования, атлантические воды в Арктическом бассейне, интрузии, каскадинг, холодные шельфовые воды, тихоокеанские воды, межгодовые изменения ключевых характеристик СЛО, уровень арктических морей, динамическая топография океана, долгопериодные изменения термохалинных характеристик.

ВВЕДЕНИЕ

Океанологические исследования Северного Ледовитого океана (СЛО) стали особенно актуальными в связи с быстрыми изменениями климата Арктики и структурными преобразованиями океана, которые произошли в последние десятилетия.

Аномальные изменения термохалинной структуры СЛО в период и после Международного полярного года (МПГ) 2007/08 (Фролов и др. 2009; Woodgate et al., 2010; Timokhov et al., 2012) и содержания пресных вод в Канадском бассейне (McPhee et al., 2009; Timokhov et al., 2012), сокращение площади льдов летом в 2007 и 2012 гг. до исторических минимумов дают основание полагать, что термохалинная структура и циркуляция СЛО перешли в новую фазу климатического состояния. В связи с этим важность и актуальность мониторинга акватории СЛО, выполнения исследований океанологических процессов и поиска закономерностей долгопериодных изменений гидрологического режима СЛО в новых климатических условиях не вызывают сомнения.

В настоящей статье дается краткий обзор последних натуральных исследований и перечень основных результатов изучения океанологических процессов. В последнем разделе анализируются межгодовые изменения ключевых характеристик СЛО последнего десятилетия в сопоставлении с историческим периодом 1948–1993 гг. и обсуждается сопряженность долгопериодных колебаний элементов гидрологического режима СЛО и внешних гидрометеорологических факторов.

ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На протяжении последних лет основные работы, связанные с мониторингом гидрологического режима СЛО, выполнялись в рамках таких проектов, как дрейфующие станции «Северный полюс» (СП), работы по определению и обоснованию внешней границы континентального шельфа (ВГКШ), российско-германская программа «Система моря Лаптевых», российско-американская программа долговременного мониторинга состояния вод бассейнов Нансена и Амундсена (АВЛАП/NABOS), Арктический плавучий университет и ряда других.

В период 2002–2009 гг. ААНИИ совместно с Международным арктическим научно-исследовательским центром (США) участвовал в программе долговременного мониторинга состояния вод бассейнов Нансена и Амундсена АВЛАП/NABOS. В 2013 г. эти исследования были продолжены, прошла первая из трех планируемых арктических экспедиций в рамках проекта NABOS.

Экспедиционные исследования являются важной составляющей российско-германской программы «Система моря Лаптевых». По инициативе научных учреждений России (ААНИИ) и Германии (АВИ, ИФМ-ГЕОМАР) в рамках Соглашения между Россией и Германией в 2013 г. был выдвинут проект «Трансполярная система СЛО: прошлое, настоящее и будущее» (ТРАНСДРИФТ). В рамках этого проекта в 2013 и 2014 гг. летом были проведены две морские экспедиции.

Большой объем данных о состоянии вод Арктического бассейна СЛО был получен в результате наблюдений на дрейфующих станциях СП-37 — СП-40, работавших в период с 2009 по 2013 г. На регулярной основе оперативно поступают данные зондирования дрейфующих буев типа ИТР (Ice-Tethered Profiler), что в некоторой степени восполняет отсутствие в настоящее время информации дрейфующих станций.

Хотя основными целями экспедиций, проводившихся в 2010, 2011 и 2014 гг. на борту НЭС «Академик Федоров», были определение и обоснование внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в СЛО, в ходе исследований был получен обширный объем данных о природных условиях Арктического бассейна СЛО как к востоку, так и к западу от хребта Ломоносова. С 2012 г. на протяжении трех последних лет Северный Арктический федеральный университет (САФУ, г. Архангельск) совместно с Росгидрометом при поддержке Русского географического общества (РГО)

осуществляют научно-образовательный проект «Арктический плавучий университет». Основными объектами исследований являются природные системы Белого, Баренцева, Гренландского и Карского морей. Всего было проведено 4 морские экспедиции.

ОКЕАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Адвекция атлантических вод в Арктическом бассейне

Наблюдения, выполненные экспедициями АВЛАП/NABOS в 2002–2009 и 2013 гг., оказались уникальными. На основе полученной информации удалось не только зафиксировать сам факт значительного потепления атлантических вод Евразийского бассейна, но и получить оценки скорости распространения атлантических вод, установить характерные сроки фазового запаздывания тепловых волн, распространяющихся из района Северной Атлантики, и выделить характеристики сезонного цикла в ряде ключевых районов.

Первые признаки новой волны тепла атлантических вод в Евразийском суббассейне были отмечены в конце января 2004 г. на дрейфующей станции СП-32 при подходе к проливу Фрама вдоль хребта Гаккеля. Здесь была зарегистрирована максимальная температура атлантических вод $+1,98\text{ }^{\circ}\text{C}$, что значительно выше ранее наблюдавшихся значений. В ходе морской экспедиции АВЛАП/NABOS-2004 по наблюдениям на разрезе по 126° восточной долготы было установлено, что температура атлантических вод в этом районе значительно выросла по сравнению с летом 2003 г. Наблюдения в других частях Северного Ледовитого океана показали, что причиной потепления явилось интенсивное поступление теплых и соленых вод через пролив Фрама. Экстремальное потепление глубинных атлантических вод выглядело как новый шаг к потеплению Арктики (Polyakov et al., 2005). По оценке (Polyakov et al., 2005) аномалия атлантической воды распространяется от Фареро-Шетландского пролива до пролива Фрама примерно за год, а от пролива Фрама к центральной части моря Лаптевых время адвекции атлантической воды составляет 4–5 лет. В работе (Dmitrenko и др., 2008) выполнен анализ данных наблюдений экспедиций АВЛАП/NABOS 2002–2005 гг., а также экспедиции на НЭС «Академик Федоров» в 2005 г. Данные наблюдений, включая серии наблюдений на подводных буйковых станциях, позволили получить оценки скорости распространения атлантических вод вдоль материкового склона Евразийского суббассейна. От пролива Фрама до северной части моря Лаптевых средняя скорость распространения атлантических вод составляет 2,3–2,5 см/с. Вдоль хребта Ломоносова средняя скорость распространения вод атлантического происхождения составила около 2 см/с.

Трансформация атлантических вод в Евразийском суббассейне

Одной из главных целей программы NABOS является исследование роли процессов трансформации атлантических вод (АВ) на материковом склоне по пути их следования от пролива Фрама к морю Лаптевых в формировании современных климатических изменений в Арктике. В.В. Иванов и Е.О. Аксенов (2013) на основании данных наблюдений, выполненных на НЭС «Академик Федоров» (ААНИИ) и л/к «Полярштерн» (института им. Альфреда Вегенера, AWI) в июле–сентябре 2007 г., и моделирования исследовали процесс трансформации атлантической воды, распространяющейся вдоль материкового склона Евразии (рис. 1). Структура переноса АВ вдоль евразийского континентального склона оказалась более сложной, чем считалось ранее.

Интенсивное взаимодействие между отдельными ветвями атлантической воды на участке от зоны их слияния (к северу от желоба Св. Анны) до центральной части

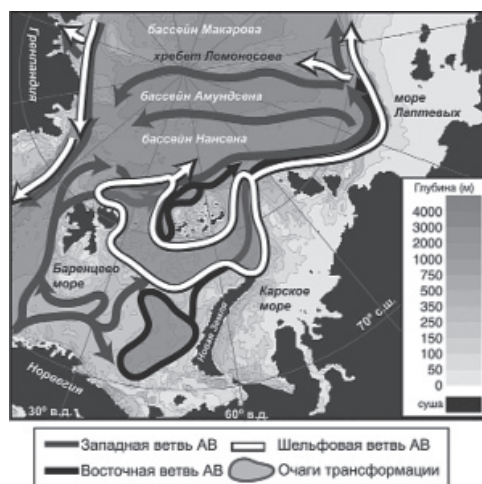


Рис. 1. Схема распространения атлантических вод в приатлантической Арктике (Иванов, Аксенов, 2013).

моря Лаптевых приводит к изменению переноса и трансформации термохалинных характеристик водных масс. Наблюдаемой трансформации также способствует перемешивание с уплотненными водами, формирующимися на шельфе архипелага Северная Земля. Важнейшим результатом этого сложного взаимодействия является формирование новой водной массы, основными компонентами которой являются Фрамовская и Баренцевоморская ветви атлантической воды. Эта водная масса охватывает диапазон глубин от 200 до 1000 м и имеет положительную температуру.

Наблюдаемое с конца XX в. сокращение летнего арктического ледяного покрова способствует усилению влияния атлантических вод на тепловой режим Арктического бассейна. При значительном уменьшении летнего ледяного покрова Фрамовская ветвь и Баренцевоморская ветвь атлантических вод будут медленнее терять тепло в силу того, что потери тепла на таяние льда от этого источника уменьшатся. При этом увеличится прогрев поверхностного слоя воды в летний период, что также может способствовать меньшей диссипации тепла вод атлантического происхождения. В результате параметры ветвей атлантической воды в зоне слияния могут заметно измениться в сторону возрастания температуры. Следствием этого может стать более интенсивный адвективный приток тепла в Арктический бассейн и, соответственно, продвижение зоны атлантического влияния в направлении Канадского сектора Арктического бассейна — так называемая «атлантификация» («Atlantification») Арктики — процесс, документированный в настоящее время в Баренцевом море (Årthun et al., 2012). Но эта гипотеза нуждается в проверке.

Интрузии в СЛО

Экспедиционные исследования 2007–2009 гг. дали возможность углубить знания о распространенности в СЛО интрузионного расслоения океана в районах, прилегающих к материковому склону Евразийского суббассейна. Анализ материалов наблюдений показал присутствие зон повышенной интенсивности тонкоструктурных аномалий на вертикальных профилях температуры и солёности. Свидетельством интрузионной природы тонкой вертикальной структуры является высокая про-

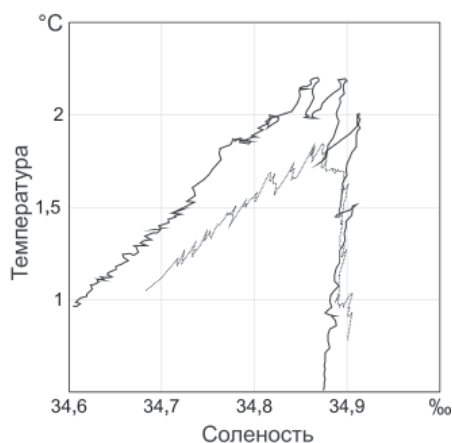


Рис. 2. *TS*-кривая, полученная в результате изопикнического осреднения всех STD-наблюдений, выполненных в 2007–2009 гг. к северу от Земли Франца-Иосифа в радиусе 250 км от точки с координатами 45° в.д., 85° с.ш. (сплошная линия); и *TS*-кривая, построенная для этого же района по данным STD-наблюдений, выполненных до 2003 г. (пунктирная линия) (Кириллов, Тимохов, 2011).

странственная когерентность наблюдаемых неоднородностей в вертикальном распределении температуры и солености вдоль изопикнических поверхностей (рис. 2).

Было установлено, что интенсивность развития термохалинных интрузий на боковых границах струи атлантических вод тесно связана с ее термохалинными характеристиками. В работе (Кириллов, Тимохов, 2011) сделан вывод о том, что интрузионное расслоение является механизмом обратной связи и способствует усилению отдачи тепла и соли на боковой границе АВ в случае увеличения их температуры и солености. Дальнейшая потеря тепла и соли в интрузионных прослойках, радиально распространяющихся от струи АВ, по всей видимости, имеет место в районах выхода интрузий в шельфовые районы СЛЮ. Это происходит вследствие разрушения системы регулярных интрузионных прослоек за счет интенсификации процессов вертикального обмена над континентальным склоном. В то же время авторы отмечают, что вопрос о трансформации интрузионных структур над континентальным склоном и связанных с этим потерях тепла и соли продолжает оставаться открытым.

Каскадинг на шельфе и континентальном склоне Земли Франца-Иосифа

Формирование уплотненных вод на арктических шельфах и последующее гравитационное стекание этих вод вдоль континентального склона (каскадинг) является важным структурообразующим процессом в Северном Ледовитом океане. В условиях сильной вертикальной стратификации, типичной для глубоководных бассейнов СЛЮ, зимняя термохалинная конвекция ограничена пикноклином, оставляя каскадингу роль основного механизма обновления промежуточных и глубинных вод. Прямые наблюдения каскадинга в Арктике крайне редки. В.В. Иванов (2011) выполнил сравнительное описание наблюдаемых случаев каскадинга на склоне Земли Франца-Иосифа по данным экспедиций на ледоколах «Полярштерн» (2007) и «Капитан Драницын» (2009). В 2007 г. холодная и распресненная (по сравнению с атлантической водой) водная масса занимала придонный слой от бровки шельфа (200 м) до глубины 500 м. В 2009 г. аналогичный разрез, с детальным разрешением на шельфе, указывает на источник

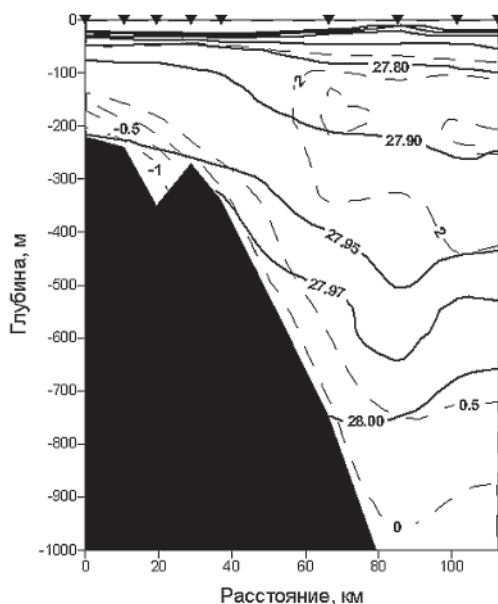


Рис. 3. Распределение потенциальной плотности (сплошные линии) и температуры (пунктирные линии) на гидрологическом разрезе в рейсе л/к «Капитан Драницын» в августе 2009 г.

уплотненной воды на шельфе с температурой $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соленостью 34,80 ‰ (рис. 3). На мелководном шельфе к северу от архипелага Земля Франца-Иосифа существуют благоприятные условия для формирования уплотненных вод и их стекания в котловину Нансена. Данные гидрологических наблюдений летом 2007 и 2009 гг. позволяют заключить, что наиболее интенсивное формирование уплотненной воды происходит в зимний сезон при открытии запримайной полыни. В то же время поднимающаяся близко к поверхности атлантическая вода способна дополнительно усилить каскадинг в летний сезон, благодаря поддержанию резких горизонтальных градиентов. Максимальная глубина проникновения шельфовой воды составляет 700 м. По данным более ранней работы (Walsh et al., 2007) глубина проникновения шельфовой воды зимой 1979/80 г. достигала 1000 м. Обусловленные каскадингом потоки тепла и соли приводят к охлаждению и распреснению атлантической воды, распространяющейся вдоль континентального склона котловины Нансена.

Процессы в придонной части шельфа моря Лаптевых

В работе (Hoelemann et al., 2011), были проанализированы данные наблюдений двух донных станций к северу от дельты реки Лены на глубинах 43 и 32 м за период с сентября 2007 по сентябрь 2009 г. Анализ серий наблюдений позволил установить потепление и распреснение придонного слоя и выявить причины изменений.

Летом 2013 г. российско-германская экспедиция «ЛАПЭКС-2013/TRANSDRIFT-XXI», применив новую технологию зондирования, получила детальную картину мезомасштабного распределения температуры и солености на океанографических разрезах в море Лаптевых. Полученные данные предоставили возможность исследовать состояние шельфовых вод и получить оценки элементов структуры холодных шельфовых вод в летний период. Холодные шельфовые воды составляют значитель-

ную часть термохалинной структуры моря. Они выполняют важную роль в процессе вентиляции и обновления придонного слоя арктических морей, а также занимают важное место в проблеме взаимодействия арктических морей и Арктического бассейна. В результате анализа температурных разрезов были получены оценки характеристик слоя холодных шельфовых вод.

Распространение летних тихоокеанских вод в Арктическом бассейне

Летние тихоокеанские воды (ЛТВ) поступают на шельф Чукотского моря в летний период. Дойдя до кромки шельфа, ЛТВ, обладая более высокой солесностью по сравнению с поверхностными водами СЛО, заглубляются и в Арктическом бассейне выделяются по наличию локального максимума температуры, расположенного под верхним перемешанным слоем. Распространяясь по Арктическому бассейну, ЛТВ отдают свое тепло ниже- и верхележащим слоям, оказывая влияние на температуру поверхностного слоя и толщину ледяного покрова. В работе (Махотин, 2011) рассматриваются особенности распространения ЛТВ в Арктическом бассейне. Впервые для периода 1950–1989 гг. показано распространение среднего и максимального положения границ, теплосодержания, глубин залегания слоя ЛТВ. Согласно полученным данным, в 2008–2009 гг. в Арктическом бассейне наблюдалось аномальное положение границ распространения ЛТВ по сравнению с периодом 1950–1989 гг.

Одним из факторов, способных оказывать влияние на распространение ЛТВ, является атмосферная циркуляция над Арктическим регионом. Особенности рас-

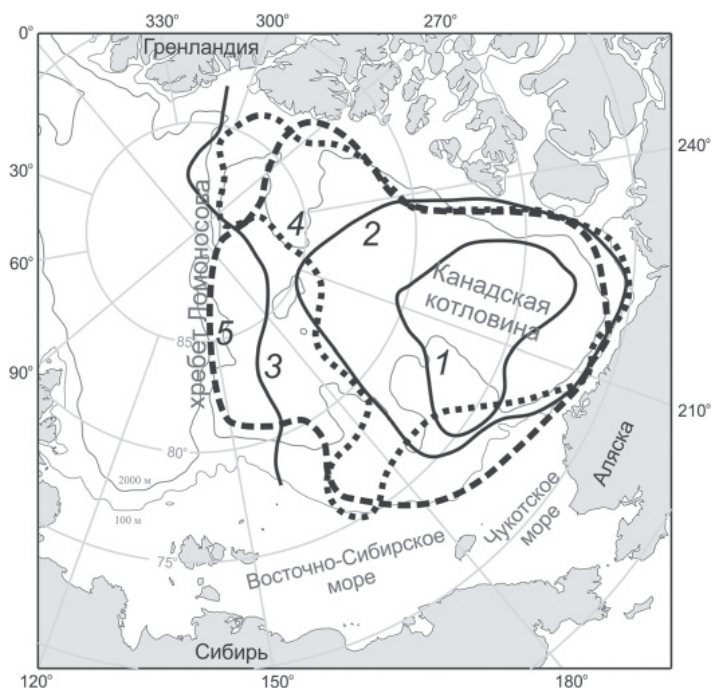


Рис. 4. Распространение летних тихоокеанских вод в Арктическом бассейне СЛО: 1 — граница распространения в 1984 г.; 2 — медиана распространения в период 1950–1989 гг.; 3 — граница максимального распространения в период 1950–1989 гг.; 4 — граница распространения в зимний период 2007–2008 гг.; 5 — граница распространения в зимний период 2008–2009 гг. (адаптировано из (Махотин, 2011)).

пространения ЛТВ в 2008 и 2009 гг. подтверждают высказанное предположение. Так, в 2008 г. ЛТВ были широко вытянуты вдоль островов Канадского Арктического архипелага и не распространялись севернее хребта Менделеева (рис. 4). Среднегодовой индекс АО (Арктическая осцилляция) в этот период был положительным и составлял 0,18 (0,22 — среднее за два года). В 2009 г., когда ЛТВ распространились далеко на север, а западная граница была не так сильно вытянута, как в 2008 г., среднегодовой индекс АО был отрицательным и составил $-0,33$ ($-0,08$ — среднее за два года) (Махотин, 2011).

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Уровень арктических морей и динамическая топография океана

Денивелиция уровня океана в центральной его части и в береговой зоне является важным показателем динамического состояния океана. Уровень арктических морей чутко отреагировал на изменения режима атмосферной циркуляции и состояния СЛЮ в конце 1980-х г. Практически во всех районах арктических морей колебания уровня моря до 1985 г. носили стационарный характер и линейный тренд уровня практически отсутствовал (табл. 1). Его значение составляло от 0,006 до 0,030 см/год при среднем значении 0,016 см/год и среднеквадратической ошибке $\pm 0,071$ см/год. После 1985 г. характер колебаний уровня на станциях арктических морей существенным образом изменился (рис. 5): в 1985 г. начался резкий подъем уровня моря, и в конце 1980-х – начале 1990-х гг. его колебания происходили на повышенном фоне. Затем наблюдалось понижение уровня моря, и во многих районах арктических морей он даже вернулся к средним значениям. Однако в конце 1990-х – начале 2000-х гг. уровень моря вновь стал повышаться и в 2005–2009 гг. достиг наблюдавшихся ранее максимумов и даже превысил их.

Величина тренда за период 1984–2014 гг. для различных районов арктических морей составила от 0,022 до 0,441 см/год при среднем значении тренда 0,244 см/год и среднеквадратической ошибке $\pm 0,097$ см/год. При этом наиболее значительный тренд был зафиксирован в юго-западной части Карского моря.

Таблица 1

Линейный тренд уровня (см/год) по районам арктических морей, определенный для трех периодов

Район	Период, гг.		
	1950–2014	1950–1986	1984–2014
Юго-запад Карского моря	$+0,286 \pm 0,029$	$+0,006 \pm 0,054$	$+0,441 \pm 0,080$
Восток Карского моря	$+0,122 \pm 0,033$	$+0,012 \pm 0,078$	$+0,022 \pm 0,090$
Новосибирские острова	$+0,215 \pm 0,039$	$+0,030 \pm 0,080$	$+0,270 \pm 0,120$
Среднее	$+0,208 \pm 0,034$	$+0,016 \pm 0,071$	$+0,244 \pm 0,097$

Основной причиной таких изменений в характере колебаний уровня арктических морей можно считать изменения макроциркуляционных процессов, наблюдающиеся в атмосфере Северного полушария. Увеличение повторяемости и интенсивности циклонов, проходящих над акваторией арктических морей, приводит к усилению циклонической циркуляции, характерной для этих морей, и, следовательно, к понижению уровня моря в центре циркуляции и повышению вдоль побережий. Иными словами, основная причина повышения уровня имеет динамический характер.

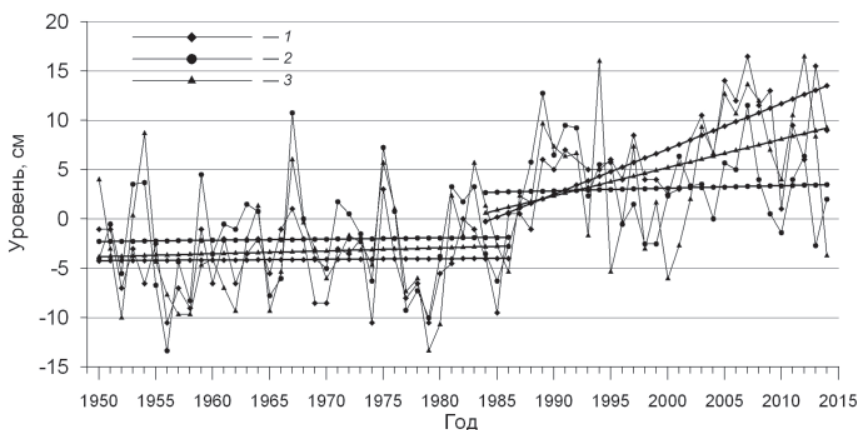


Рис. 5. Аномалии среднегодового уровня моря, осредненные по районам арктических морей: 1 — юго-запад Карского моря; 2 — восток Карского моря; 3 — Новосибирские острова. Прямыми линиями показаны линейные тренды.

После понижения среднего уровня моря в 2010 г. (рис. 5), отмечавшегося практически на всей акватории арктических морей, последовавшего за ним повышения среднего уровня в 2011 г. и сохранения повышенного фона в 2012 г. и в 2013 г., в 2014 г. произошло некоторое снижение фона колебаний уровня моря, особенно существенное в районе Новосибирских островов, где уровень впервые после 2001 г. опустился ниже средних отметок.

Кроме того необходимо отметить существенные нарушения сезонного хода уровня на станциях арктических морей. Как правило, сезонные колебания уровня арктических морей отличаются хорошо выраженным годовым ходом, характеризующимся минимумом весной (март–май) и максимумом осенью (сентябрь–ноябрь). В последние годы наиболее существенные сгонно-нагонные колебания наблюдались преимущественно в ноябре–январе или июле–августе, то есть отмечается сдвиг пика сгонно-нагонных колебаний от осени к началу зимы и весне. Отмечается также и понижение абсолютных значений экстремальных сгонов и нагонов и, как следствие, величин колебаний уровня в целом.

В статье (Тимохов и др., 2012) показано, что крупномасштабные особенности динамической топографии океана с хорошим приближением моделируются аномалиями динамических высот относительно 200 дб поверхности. Изменение контраста динамической топографии между Американо-Северным и Евразийским суббассейнами сопровождается трансформацией поверхностной геострофической циркуляции. В качестве показателя контраста динамической топографии нами введена величина d_{DH} , численно равная разности между средними величинами аномалии динамических высот в зимний период для Американо-Северного $[ADH]_A$ и Евразийского $[ADH]_E$ бассейнов: $d_{DH} = [ADH]_A - [ADH]_E = [DH]_A - [DH]_E$. Одновременно была рассчитана разность уровня моря Δh на береговых станциях восточной и западной частей Российской Арктики: между уровнем моря на станциях Певек и Известия ЦИК. На рис. 6 приведены графики межгодовой вариации величины контраста динамической топографии d_{DH} и контраста уровня в прибрежной зоне. Как видно из рисунка, межгодовые флуктуации Δh и d_{DH} не всегда совпадают. Это свидетельствует о сложной динамике диневиляции уровня в центральной части Арктического бассейна и на периферии СЛО в арктических морях.

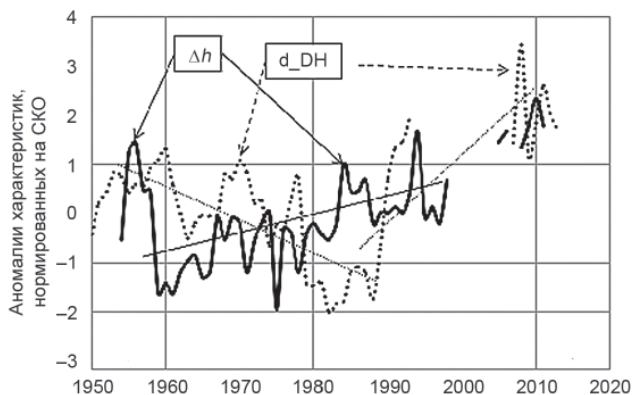


Рис. 6. Временной ход аномалий контраста динамической топографии Арктического бассейна d_DH и аномалий разности уровня моря Δh на станциях Певек и Известия ЦИК. Для сравнимости аномалии контраста динамической топографии и разности уровня моря были пронормированы на среднее квадратическое отклонение каждой характеристики.

Вместе с тем общая тенденция изменения контраста динамической топографии и разности уровня моря между востоком и западом совпадает. До 1980-х гг. контраст уменьшался, что сопровождалось ослаблением поверхностной геострофической циркуляции, а после 1980-х гг. контраст увеличивался, что сопрягается с усилением интенсивности геострофической циркуляции.

Долгопериодные изменения термохалинных характеристик СЛО

В поверхностном и верхнем слоях самые большие изменения термохалинных характеристик в период и после МПГ 2007/08 произошли в Амеразийском суббассейне. На рис. 7 приведены средние величины солёности верхнего слоя для суббассейнов в зимний период, показывающие, что с 2007 по 2013 г. величина средней солёности в Амеразийском суббассейне значительно уменьшилась по сравнению с периодом

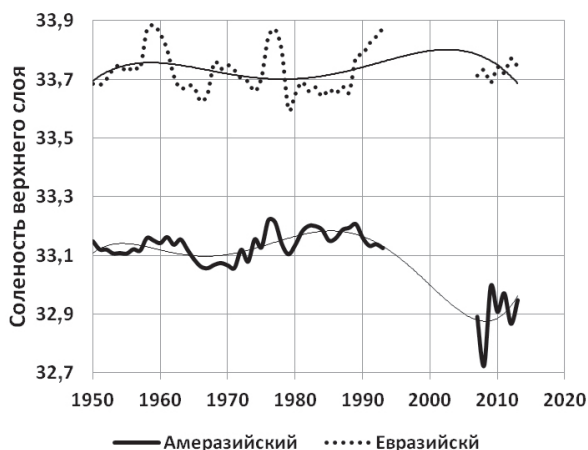


Рис. 7. Межгодовые изменения средней солёности верхнего слоя в зимний период в Амеразийском и Евразийском суббассейнах. Тонкими линиями показаны полиномиальные кривые шестой степени.

1950–1993 гг. и в 2008 г. достигла исторического минимума. В то же время флуктуации средней солёности верхнего слоя Евразийского суббассейна не выходили за пределы амплитуды периода 1950–1993 гг. Следствием экстремального изменения распределения солёности и, следовательно, поля плотности верхнего слоя океана стала аномальная перестройка структуры поверхностной геострофической циркуляции, как это было показано выше.

Какие же причины могли вызвать столь радикальные изменения термохалинной структуры верхнего слоя? Нами был выполнен корреляционный анализ связи средней солёности с различными гидрометеорологическими показателями и климатическими индексами. В качестве показателя таяния льда нами использована величина площади открытой воды летом в арктических морях, учитывая, что положение кромки льда зависит не только от таяния, но и от дрейфа льда. На рис. 8 приведены кривые межгодовой изменчивости аномалии средней солёности верхнего слоя Амеразийского суббассейна в зимний период, аномалии годового расхода воды через Берингов пролив (аномалия приведена со знаком минус), аномалии площади открытой воды в августе в морях Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское (аномалия приведена со знаком минус) и аномалии трехлетнего скользящего значения индекса атмосферной циркуляции АО (арктическая осцилляция). В масштабе десятилетий видим тесную сопряженность изменения анализируемых характеристик. Именно усилившееся поступление тихоокеанских вод, увеличение объема пресных вод вследствие таяния льда летом, влияние режима атмосферной циркуляции (здесь мы ограничились только одним индексом) стали главными причинами изменения термохалинной структуры верхнего слоя СЛО, прежде всего Амеразийского суббассейна. Отметим, что таяние льда в арктических морях зависит от потоков атмосферного тепла, солнечной радиации, а также воздействия ветра. В 2007 г. аномально большие потоки тепла и импульса с юга стали факторами, которые сформировали аномальное таяние льда и быстрое отступление кромки льдов на север, создав беспрецедентное сокращение площади льдов в СЛО.

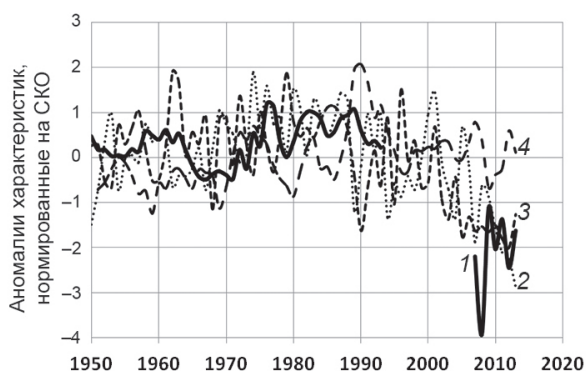


Рис. 8. Межгодовая изменчивость аномалии средней солёности верхнего слоя Амеразийского суббассейна в зимний период, годового расхода воды через Берингов пролив, площади открытой воды в августе в морях Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское (аномалия приведена со знаком минус) и трехлетнего скользящего значения индекса атмосферной циркуляции АО.

1 — солёность верхнего слоя Амеразийского суббассейна; 2 — расход воды через Берингов пролив со знаком минус; 3 — площадь открытой воды в августе в восточных морях со знаком минус; 4 — трехлетний скользящий индекс атмосферной циркуляции АО.

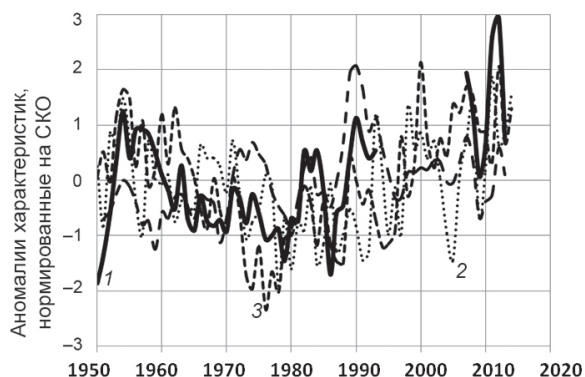


Рис. 9. Аномалии температуры атлантической воды в Евразийском суббассейне, расхода воды через Берингов пролив с временным лагом — 4 года, среднего годового индекса АМО со сдвигом — 6 лет и трехлетнего скользящего индекса АО.

1 — температура атлантической воды в Евразийском суббассейне; 2 — расход воды через Берингов пролив с лагом — 4 года; 3 — средний годового индекса АМО с лагом — 6 лет.

Изменения температуры атлантической воды в Евразийском суббассейне (рис. 9) происходят, прежде всего, вследствие вариаций теплового состояния Северной Атлантики (индекс АМО, Atlantic Multidecadal Oscillation) с запаздыванием на 6 лет. Но изменение температуры атлантической воды в Евразийском бассейне также коррелирует с атмосферной циркуляцией над СЛО (аномалия трехлетнего скользящего индекса АО) и поступлением тихоокеанской воды через Берингов пролив с временным лагом — 4 года. Заметим, что корреляция температуры атлантической воды с затоком тихоокеанской еще не значит, что между ними существует прямая физическая связь. Управляющим фактором кажущейся связанности может быть цепочка сложного взаимодействия слоев атлантической и тихоокеанской воды или какой-то глобальный процесс.

Результаты корреляционного анализа показали тесную связь между температурой в слое атлантической воды и придонном слое. Подтверждается вывод Е.Г. Никифорова и А.О. Шпайхера (1980), что увеличение температуры атлантических вод сопровождается увеличением температуры придонного слоя.

Проведенное исследование показывает, что в долгопериодном плане между ключевыми характеристиками СЛО и индексами теплового состояния Атлантики и Тихого океана, а также индексами атмосферной циркуляции наблюдается когерентность. Главными причинами изменения состояния СЛО по-прежнему являются взаимодействие его с Атлантикой и Тихим океаном и атмосферные процессы. Учитывая, что состояние вод Атлантического и Тихого океанов не остается постоянным вследствие воздействия изменяющегося глобального климата и обратного влияния изменений СЛО, задача моделирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима СЛО вырастает в проблему создания репрезентативных глобальных моделей Мирового океана, атмосферы и криосферы в их взаимодействии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. ААНИИ в последнее десятилетие выполнял обширные экспедиционные исследования Северного Ледовитого океана. В ряду других выполняющихся ААНИИ программ, таких как дрейфующие станции «Северный полюс», расстановка дрейфующих

бுவ ИТР, научно-исследовательский стационар «Ледовая база “Мыс Баранова”», особую важность имеют российско-американский проект «Система наблюдений в бассейнах Нансена и Амундсена» (NABOS) и российско-германский проект «Транспольярная система Северного Ледовитого океана» (ТРАНСДРИФТ). Натурные исследования по международным проектам внесли весомый вклад в изучение океанических процессов СЛО. Многие результаты опубликованы как в российских, так и зарубежных изданиях. Учитывая выигрыш российской стороны от сотрудничества и заинтересованность американской и германской сторон в продолжении совместных работ в СЛО, представляется целесообразным продолжить совместные российско-американские и российско-германские исследования, направленные на изучение изменений состояния СЛО в эпоху быстрых изменений климата в Арктике и получение новых знаний об океанических процессах и макромасштабных вариациях гидрологического режима как основы развития теории и моделирования изменений СЛО. Полученные в экспедициях данные наблюдений, а также океанографические наблюдения зарубежных экспедиций и наблюдательских программ пополнили базу океанографических данных ААНИИ. Данные используются для решения практических и научных задач, направленных, в том числе, на внедрение в оперативную работу моделей и технологий расчетов гидрометеорологических параметров, развитие баз данных гидрологических и гидрохимических характеристик по акваториям арктических морей. Пополнение базы данных гидрологических характеристик и удлинение ряда наблюдений дает возможность исследовать отклик морских экосистем на происходящие глобальные климатические изменения и прогнозировать их развитие в будущем.

2. Основные закономерности долгопериодной изменчивости СЛО и главные причины крупномасштабных колебаний его гидрологического режима, установленные в прошлом столетии (Никифоров, Шпайхер, 1980), не изменились и в современную эпоху аномальных изменений климата Арктики. Главными причинами происходящих трансформаций термохалинной структуры и циркуляции СЛО по-прежнему являются атмосферные процессы и взаимодействие его с Атлантикой и Тихим океаном, роль которых особенно возросла в последние десятилетия. В этот период атлантические воды, вторгающиеся в Арктический бассейн через пролив Фрама и Баренцево море, вызвали экстремальное потепление атлантического слоя в Арктическом бассейне и перестройку термохалинной структуры СЛО. Усилилось поступление теплых тихоокеанских вод через Берингов пролив в СЛО, которые также оказали влияние на термохалинную структуру морей Чукотского и, частично, Бофорта, а также Арктического бассейна. Наконец, значительный вклад внесли атмосферные процессы, режим которых значительно отличался от режима атмосферной циркуляции предыдущей климатической стадии. Возвратится ли состояние СЛО к климатическому среднему прошлого века или произойдет переход климатической системы, включающей термохалинные поля и циркуляции океана, макроструктуру и дрейф ледяного покрова, к новому, ранее не наблюдавшемуся, состоянию, во многом будет зависеть от тенденций изменения глобального климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Иванов В.В. Наблюдения каскадинга на шельфе и континентальном склоне Земли Франца-Иосифа // Вклад России в МПГ 2007/08. Океанография и морской лед / Под ред. И.Е. Фролова. М.: Paulsen, 2011. С. 178–195.

Иванов В.В., Аксенов Е.О. Трансформация атлантической воды в восточной части котловины Нансена по данным наблюдений и моделирования // Проблемы Арктики и Антарктики, 2013. № 1 (95). С. 72–87.

Кириллов С.А., Тимохов Л.А. Тонкая термохалинная структура интрузионного происхождения в атлантических водах Арктического бассейна // Вклад России в МПГ 2007/08. Океанография и морской лед / Под ред. И.Е. Фролова. М.: Paulsen, 2011. С. 157–168.

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

Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане (2007–2014) / Под ред. И.Е. Фролова. СПб.: ААНИИ. URL: <http://www.aari.ru/main.php> [дата обращения 03.03.2015].

Л.А.Тимохов, Н.В. Лебедев, В.Ю. Карний, Е.Г. Никифоров. Динамическая топография океана и поверхностная геострофическая циркуляция в Арктическом бассейне в период 2007–2011 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (91). С. 89–102.

Фролов И.Е., Ашик И.М., Кассенс Х., Поляков И.В., Прошутинский А.Ю., Соколов В.Т., Тимохов Л.А. Аномальные изменения термохалинной структуры Северного Ледовитого океана // ДАН. 2009. Т. 429. № 5. С. 688–690.

Årthun, M.A., Eldevik T., Smedsdrud L.H., Skagseth O., Ingvaldsen R.B. Quantifying the influence of Atlantic heat on the Barents Sea ice variability and retreat // Journ. Clim. 2012. Vol. 25. P. 4736–4743.

Holemann J.A., Kirillov S., Klagge T., Novikhin A., Kassens H., Timokhov L. Near-bottom water warming in the Laptev Sea in response to atmospheric and sea-ice conditions in 2007 // Polar Research. 2011. Vol. 30. doi: 10.3402/polar.v30i0.6425.

Dmitrenko I., Polyakov I.V., Kirillov S.A., Timokhov L.A., Frolov I.E., Sokolov V.T., Simmons H.L., Ivanov V.V., Walsh D. Toward a warmer Arctic Ocean: Spreading of the early 21st century Atlantic Water warm anomaly along the Eurasian Basin margins // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. c05023, doi:10.1029/2007JC004158.

McPhee M.G., Proshutinsky A., Morison J.H., Steele M., Alkire M.B. Rapid change in freshwater content in the Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2009. Vol. 36. L10602, doi:10.1029/2009GL037525.

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., Simmons 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.

Timokhov L., Ashik I., Dmitrenko I., Holemann J., Kassens H., Kirillov S., Polyakov I., Sokolov V. Extreme changes of the Arctic Ocean during and after IPY 2007/2008 // Polarforschug. 2011 (erschienen 2012). Vol. 81 (2). P. 85–102.

Walsh D., Polyakov I., Timokhov L., Carmack E. Thermohaline structure and variability in the eastern Nansen Basin as seen from historical data // Journal of marine research. 2007. Vol. 65. № 5. P. 685–714(30). doi: 10.1357/002224007783649466.

Woodgate R.A., Weingartner T., Lindsay R. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat // Geophys. Res. Lett. 2010. Vol. 37. L01602, doi:10.1029/2009GL041621.

*I.M. ASHIK, V.V. IVANOV, H. KASSENS, M.S. MAKHOTIN, I.V. POLYAKOV,
L.A. TIMOKHOV, I.E. FROLOV, J.A. HOELEMANN*

MAJOR RESULTS OF OCEANOGRAPHIC STUDIES OF THE ARCTIC OCEAN DURING THE LAST DECADE

An overview of the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) oceanographic studies over the last seven years is presented. A brief description of expedition activities is given. The most

important studies of the oceanographic processes such as advection and transformation of Atlantic waters in the Eurasian Basin and marginal arctic seas, intrusions and cascading on the shelf and continental slope of Franz Joseph Land, near-bottom processes in the Laptev Sea are highlighted. The last section is devoted to interannual changes of the key characteristics of the Arctic Ocean during the last decade relative to historical period of 1948-1993; new information about changes of sea level in the Arctic seas and dynamic ocean topography, the thermohaline characteristics of Arctic Ocean and their correspondence to changes of external factors is provided. It is hypothesized that the return of the Arctic Ocean to its climatic mean state observed in the last century or the beginning of irreversible reconstruction of the structure of climatic system (e.g. thermohaline fields, oceanic circulation, macrostructure and drift of the sea ice cover) will depend on tendencies driven by global climate change.

Keywords: The Arctic Ocean, oceanographic studies, Atlantic waters in the Arctic basin, intrusions, cascading, cold shelf waters, Pacific waters, interannual changes of key characteristics of the Arctic Ocean, sea level of the Arctic seas, dynamic topography of the ocean, long-term variability of thermohaline characteristics.