

Современные океанографические исследования ААНИИ в Арктике и их основные результаты

И.М. Ашик, Е.В. Блошкина, М.С. Махотин, И.Е. Фролов

В статье кратко освещены основные результаты изучения вод Арктического бассейна Северного Ледовитого океана и арктических морей на протяжении периода, охватывающего последнее десятилетие. Приведены сведения о наиболее значительных экспедициях, проводившихся в высокоширотной Арктике после Международного полярного года 2007/08, и крупных обобщениях результатов наблюдений. Обращается внимание на сохранение и углубление тенденций в изменениях термохалинных условий на акватории морей высокоширотной Арктики.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, океанологические исследования, океанические водные массы, долгопериодные изменения термохалинных характеристик.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№14-05-00039, 18-05-60107 и 18-05-60048).*

Арктика для России является зоной особых экономических, геополитических и социальных интересов. Активное изучение и освоение Арктики, необходимость слежения за экологическим состоянием океана и особенно его прибрежных областей ставят в качестве главной текущей задачи организацию и осуществление мониторинга всей толщи Северного Ледовитого океана (СЛО) в реальном времени по комплексу метеорологических, ледовых, гидрофизических, геохимических, геофизических, биологических и др. параметров.

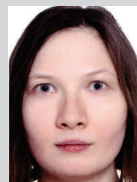
На протяжении последнего десятилетия мониторинг гидрологического режима СЛО выполнялся в рамках таких проектов, как дрейфующие станции «Северный полюс», «Арктический плавучий университет», российско-германская программа «Система моря Лаптевых» («ЛАПЭК/TRANSDRIFT»), российско-американская программа долгосрочного мониторинга состояния вод бассейнов Нансена и Амундсена («АВЛАП/NABOS»), работы по определению и обоснованию внешней границы континентального шельфа (ВГШК). Значительным событием в экспедиционных исследованиях СЛО

стал проект «Трансарктика-2019». Существенный вклад в понимание формирования и развития гидрологических процессов и явлений в локальных районах внесли такие программы как «Ямал – Арктика», изучение состояния вод внутренних фьордов Шпицбергена, наблюдения в проливе Шокальского, экспедиция «Арктика-2021» (рис. 1).

На протяжении многих лет дрейфующие станции «Северный полюс» являлись одним из основных источников информации о состоянии гидрометеорологических условий в высокоширотной Арктике. С конца 1950-х гг. до начала 1991 г. в Арктическом бассейне постоянно работала одна-две дрейфующие станции. К сожалению, меняющийся климат сыграл решающую роль в судьбе дрейфующих станций. Деграция ледяного покрова при-



АШИК
Игорь Михайлович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



БЛОШКИНА
Екатерина
Владимировна
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



МАХОТИН
Михаил Сергеевич
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



ФРОЛОВ
Иван Евгеньевич
Член-корреспондент РАН,
профессор, научный руководитель
Арктического и антарктического
научно-исследовательского
института

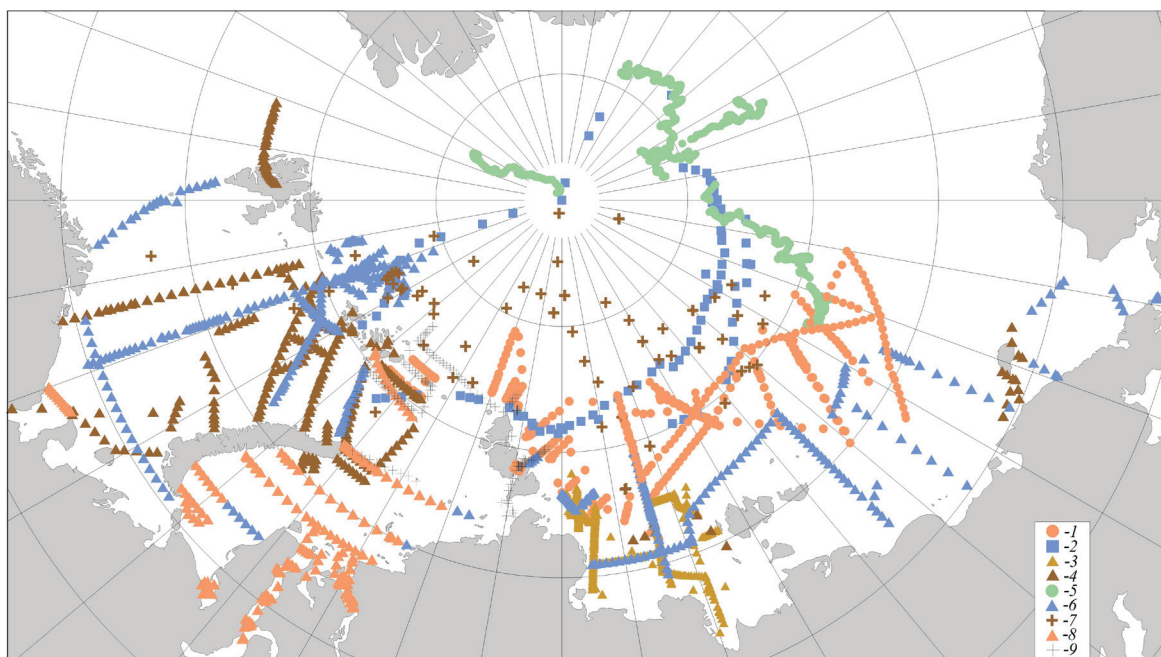


Рис. 1. Положение станций, выполненных в рамках различных экспедиций в Северном Ледовитом океане с 2011 г.: 1 – экспедиции «АВЛАП/NAVOS», 2 – экспедиции «Арктика», 3 – экспедиции «ЛАПЭК/TRANSDRIFT», 4 – экспедиции «Плавучий университет», 5 – экспедиции «СП», 6 – экспедиции «Трансарктика-2019», 7 – экспедиция «Шельф», 8 – экспедиция «Ямал-Арктика», 9 – экспедиция «Арктика-2021».

вела к непреодолимым трудностям в организации и работе этих станций. В июне 2013 г. завершила свой дрейф станция СП-40. Имущество, научное оборудование и личный состав станции были доставлены на мыс Баранова (остров Большевик, архипелага Северная Земля), где комплексное изучение Арктики продолжилось на научно-исследовательской ледовой базе «Мыс Баранова».

Прекращение наблюдений на дрейфующих станциях носит временный характер. Для продолжения и развития комплексных научных исследований в высоких широтах Северного Ледовитого океана ГНЦ РФ «ААНИИ» предложил реализовать инновационный проект по созданию плавучей ледостойкой самодвижущейся платформы – базы будущих дрейфующих научно-исследовательских станций «Северный полюс» – как форпоста российской науки в высоких широтах Арктики. Строительство ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) «Северный полюс» начато в 2018 г., в декабре 2021 г. она была спущена на воду, в сентябре 2022 г. планируется первый рейс.

Значительный вклад в исследования гидрологических условий Северного Ледовитого океана внесла российско-американская экспедиция «АВЛАП/NAVOS». Первый этап работ в рамках данного проекта проходил в период с 2002 г. по 2009 г. ААНИИ совместно с Международным арктическим научно-исследовательским центром (International Arctic Research Center, IARC, США) участвовал в программе долговременного мониторинга состояния вод бассейнов Нансена и Амундсена (Nansen Amundsen Basins Observation System – NAVOS). В русской транскрипции проект имел название «АВЛАП» (Атлантические Воды в море Лаптевых).

Наблюдения, выполненные экспедициями АВЛАП/NAVOS в 2002–2009 гг., оказались уникальными. На основе полученной информации удалось зафиксировать факт значительного потепления атлантических вод Евразийского суббассейна и установить пульсационный характер распространения тепловых волн от пролива Фрама в Арктическом бассейне (АБ) и выделить характеристики сезонного цикла в ряде ключевых районов. В 2013 г. работы в рамках проекта «АВЛАП/NAVOS» были возобновлены и продолжены экспедициями 2015 г., 2018 г. и 2021 г. Экспедиционные исследования были направлены на получение комплексной информации о состоянии природной системы в районе континентального склона Евразии и морей арктического шельфа, взаимодействии основных ее компонент и влиянии на формирование климатических изменений в северных полярных районах. В ходе экспе-

диции устанавливались притопленные буйковые станции, с помощью которых выполнялся сбор информации о пространственно-временных изменениях комплекса гидрофизических характеристик вод СЛО, были получены оценки параметров скоростей и направлений морских течений, их сезонной и межгодовой изменчивости, характеристик приливных течений и пр.

На протяжении многих лет исследования состояния вод моря Лаптевых осуществлялись в ходе экспедиций «ЛАПЭК/TRANSDRIFT» и «ПОЛЫНЬЯ/TRANSDRIFT», проводившихся в рамках совместного российско-германского проекта «Система моря Лаптевых». Главная цель проекта – изучение закономерностей формирования природных условий региона, изменений климатических условий в регионе моря Лаптевых и оценка их влияния на изменения природной среды в современную эпоху. Основные задачи морских экспедиционных исследований состояли в изучении влияния речного стока на гидрологические, ледовые, гидрохимические, геохимические, седиментационные и биологические процессы на акватории моря Лаптевых; исследовании внутригодовой изменчивости и взаимной связи этих процессов между собой. В ключевых районах моря Лаптевых использовались донные океанографические станции, оснащенные доплеровскими профилографами течений и донными CTD-измерителями, которые выставлялись на длительный период наблюдений.

В 2019 г. был реализован проект, который может стать примером и прообразом морских научных исследований ближайшего будущего – экспедиция «Трансарктика-2019». Целями экспедиции являлись выполнение комплексных научных исследований в высокоширотной Арктике; возобновление государственного мониторинга состояния и загрязнения российских арктических морей; организация сезонной дрейфующей станции «Северный полюс» нового типа «судно – лед» на НЭС «Академик Трешников», проведение на ней научных исследований и наблюдений; апробация новых приборов, отработка технологий и методов проведения научно-экспедиционных работ для последующего применения на строящейся ледостойкой самодвижущейся платформе «Северный полюс»; реализация образовательной компоненты программы «Трансарктика-2019» на НИС «Профессор Молчанов».

В августе-сентябре 2021 г. ААНИИ совместно с Центром океанографических исследований им. Гельмгольца (ГЕОМАР, г. Киль, Германия) и Швейцарским полярным институтом провели комплексную международную экспедицию

«Арктика-2021» (Arctic Century) на борту НЭС «Академик Трешников». Экспедиция была проведена при поддержке Швейцарского Полярного Фонда и лично шведского бизнесмена и мецената Фредерика Паулсена, являющегося участником и организатором многих экспедиций в Арктике, а также основателем издательства «Paulsen», специализирующегося на публикации книг об истории исследований полярных регионов Земли. Отличительной особенностью данной экспедиции являлось проведение комплексных исследований как морской среды, так и природной среды на арктических островах с привлечением большого количества ученых, представляющих разные научные направления из ведущих научно-исследовательских учреждений России, Швейцарии и Германии.

В рамках морской части экспедиции на акватории морей Баренцева, Карского и Лаптевых были проведены метеорологические, океанологические, гидрохимические, гидробиологические и палеоокеанологические наблюдения. На островах Грэм-Белл (архипелаг Земля Франца-Иосифа), Визе, Уединения, островах архипелага Северная Земля (Комсомолец, Пионер, Октябрьской Революции, Большевик) были проведены геоморфологические, биологические и палеогеографические наблюдения.

Исследования в Баренцевом море

Наблюдения в Баренцевом море были выполнены в ходе проведения экспедиций «Арктический плавучий университет» с 2012 по 2019 гг. на НИС «Профессор Молчанов» и «Трансарктика-2019. Этап 1» на НЭС «Академик Трешников». Исследования были направлены на изучении распространения и трансформации атлантических вод (АВ) в Баренцевом море, особенно в его наименее изученной северо-восточной части.

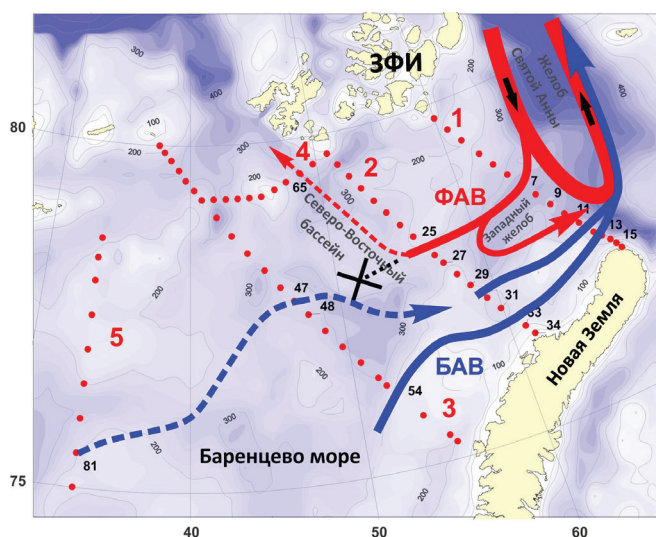


Рис. 2. Схема циркуляции атлантических вод (АВ) в северо-восточной части Баренцева моря. ФАВ – Фрамовская ветвь АВ, БАВ – Баренцевоморская ветвь АВ [1].

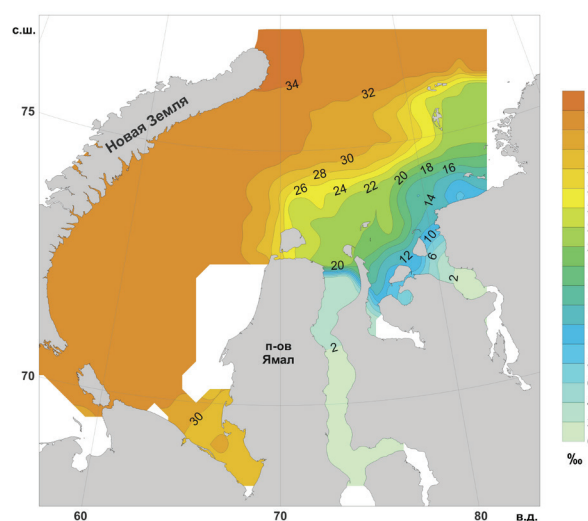


Рис. 3. Распределение поверхностной солености в Карском море по результатам экспедиции «Ямал-Арктика-2012» [2].

В результате исследований были подробно изучены пути распространения АВ в Баренцевом море и уточнена схема циркуляции в его северо-восточной части (рис. 2). Показано, что Фрамовская ветвь атлантических вод (ФАВ), затекающая в Западный желоб Баренцева моря из желоба Святой Анны, может проникать во внутреннюю акваторию Баренцева моря [1], что в процессе предыдущих исследований не наблюдалось. Уточнена схема распространения северной струи Баренцевоморской ветви атлантических вод (БАВ), распространяющейся по акватории моря в северо-восточном направлении и затекающей в Карское море.

Исследования в Карском море

Наблюдения на шельфе Карского моря были выполнены в ходе проведения экспедиций «Ямал-Арктика» в 2012 и 2013 гг. и экспедиции «Трансарктика-2019. Этап 4» на НИС «Профессор Мультановский».

Одной из основных целей исследований в Карском море являлось изучение распространения и взаимодействия морских и речных вод. Например, летом 2012 г. в Карском море было зафиксировано нетипичное смещение фронтальной

зоны между распресненными речными и морскими водами в восточном направлении (рис. 3). Обычно к концу летнего периода речные воды, как правило, распространяются от устья Оби и Енисея в северном направлении, достигая широты мыса Желания.

Наблюдаемое в летний период 2012 г. термохалинное состояние поверхностных вод Карского моря было обусловлено преобладанием ветров западного и северо-западного направлений в течение июня-августа, что привело к распространению распресненных и относительно более теплых воды речного происхождения на восток вдоль побережья и формированию значительной отрицательной аномалии солености в поверхностном слое. Центральная часть моря при этом оказалась в зоне формирования значительной положительной аномалии солености, максимальные значения которой достигали +5...+6 ‰ [2].

Исследования в море Лаптевых

Результаты наблюдений на буйковых станциях с 2007 по 2014 гг., полученных в экспедициях «ЛАПЭК/TRANSDRIFT», показали значительную межгодовую и сезонную изменчивость термохалинных характеристик в придонном слое шельфа моря Лаптевых [3–5]. В январе 2013 г. была зафиксирована аномально высокая температура в придонном слое (до +0.6 °C), причинами которой стала совокупность малой площади ледяного покрова в 2011–2012 гг. и сильно прогретого поверхностного слоя. По результатам измерений было показано, что зимой, когда акватория моря покрыта льдом, возможно существование придонного слоя с температурой,

значительно превышающей температуру замерзания, в течение нескольких месяцев [3].

В работе [6] по результатам измерений, полученных в малоизученном районе желоба Вилькицкого, было выполнено описание распределения температуры и солености для летних месяцев 2013 и 2014 гг. Так, поверхностный слой от 0 до 20 м характеризовался положительными значениями температуры, соленость увеличивалась от 20–27 ‰ до 30–32 ‰ с юга на север. Глубины более 100 м занимали воды с соленостью выше 34.5 ‰ и температурой ниже -1.5°C . Под ними были зафиксированы трансформированные атлантические воды (температура $-1...-0.5^{\circ}\text{C}$ и соленость выше 34.7 ‰), попадающие сюда из Баренцева моря через желоб Св. Анны.

Измерения течений на буйковых станциях показало наличие устойчивого потока направленного в сторону котловины Нансена со скоростью 0.2 м/с [6]. Шельфовые воды с температурой, близкой к температуре замерзания, и соленостью 34–35 ‰, целиком занимающие склон желоба, распространялись по направлению к Евразийскому суббассейну. Эти воды могут служить источником для слоя холодного галоклина в АВ, охлаждать АВ и вентилировать глубоководные слои АВ. Полученные результаты послужили поддержкой для модельных расчетов, выполненных для этого района в [7].

Исследования в Чукотском море

Согласно результатам наблюдений, выполненных в экспедиции «Трансарктика-2019. Этап 4» на НИС «Профессор Мультановский», поверхностная температура воды во всех российских арктических морях

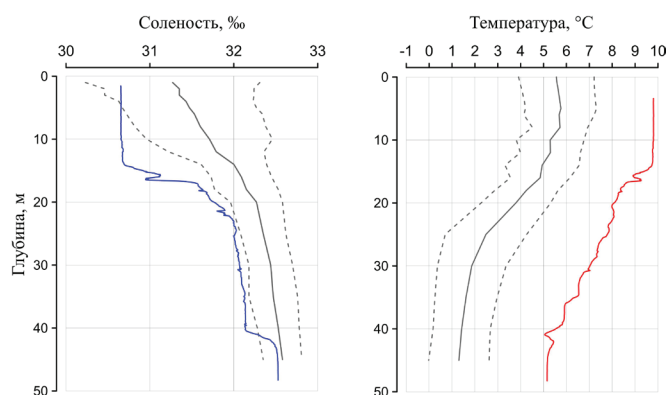


Рис. 4. Вертикальное распределение солености и температуры воды в центральной части Чукотского моря в августе 2019 г. Цветными кривыми показаны значения, полученные экспедицией «Трансарктика-2019. Этап 4». Серыми сплошной и пунктирными кривыми показаны средние значения и диапазон стандартных отклонений, рассчитанные в период 1950–2000 гг. с использованием базы данных термохалинных характеристик (БДТХ) ААНИИ [8].

в 2019 году превышала климатическую норму от $+1.4^{\circ}\text{C}$ в Восточно-Сибирском до $+4.1^{\circ}\text{C}$ в Чукотском морях. Так, в августе 2019 г. температура воды поверхностного слоя Чукотского моря составила 9.8°C (рис. 4). А максимальная положительная аномалия температуры воды была зафиксирована на глубине 25 м и составила 5.2°C [8].

Исследования в Арктическом бассейне

В результате экспедиций «АВЛАП/NABOS» было обнаружено, что потоки тепла от АВ влияют на уменьшение ледяного покрова в восточном секторе Евразийского суббассейна, что сопровождалось исчезновением слоя холодного галоклина в зимние месяцы 2013–2015 гг. [9]. Ослабление стратификации, поднятие верхней границы АВ в сочетании с уменьшением площади морского льда позволили зимней конвекции достичь более глубоких слоев и привели к увеличению потока тепла от АВ к поверхности. Эта так называемая «атлантификация» позволила сделать вывод о переходе арктического климата к новому состоянию, в котором АВ увеличивают свою степень влияния на сезонный цикл ледотаяния и ледообразования, с тенденцией к еще большему сокращению площади ледяного покрова [9].

В зимние месяцы 2017/2018 гг. впервые за историю наблюдений на буйковых станциях, работающих с 2004 по 2018 гг. в рамках экспедиций «АВЛАП/NABOS» и расположенных на континентальном склоне восточной части Евразийского суббассейна, было зафиксировано самое высокое положение верхней границы АВ – 80 м, при этом АВ располагалась сразу под однородным поверхностным слоем [10]. Полученные оценки потока тепла от АВ вверх показали значительное увеличение: от 3–4 Вт/м² зимой 2007/2008 гг. до >10 Вт/м² в зимние периоды 2016–2018 гг., что эквивалентно более чем

двукратному сокращению нарастающего льда зимой [11].

Данные с буйковых станций, полученные в экспедициях «АВЛАП/NAVOS-2013» и «АВЛАП/NAVOS-2015», были использованы для создания атласа приливных течений в Арктическом бассейне [12].

В результате анализа данных, полученных в экспедиции «ТРАНСАРКТИКА-2019. Этап I» было получено представление об особенностях распределения ФАВ и БАВ в районе исследования. Было установлено, что характер водообмена через желоб Франц-Виктории в зимне-весенний период принципиально отличается от установленного ранее по результатам летних и осенних наблюдений [13]. Для БАВ отличительной особенностью пространственной изменчивости являлось постоянство средней солёности при движении из центральной части Баренцева моря до его границы с Карским морем. Наблюдения на серии последовательных гидрологических разрезов в северо-восточной части Баренцева моря поставили под сомнение существующее представление о том, что трансформация БАВ в значительной степени обусловлена зимней конвекцией в открытом море [14].

Повышение температуры воды и уменьшение площади морского льда привели к смещению на север полярного фронта [15], который действует как естественный экологический барьер для распространения северных бореальных видов [16]. Эти изменения окружающей среды вызвали перестройку видового состава ихтиофауны за счет проникновения на север как бореальных, так и арктических сообществ, а также увеличения биомассы бореальных видов в арктической части Баренцева моря [17]. При этом изменения сообществ были зарегистрированы в Баренцевом море не только для ихтиофауны, но и для бентоса [18, 19], фитопланктона [20] и зоопланктона [21].

Такая быстрая бореализация может иметь серьезные последствия для структуры и функционирования Арктических экосистем, поскольку основные параметры развития бореальных видов и их жизненных циклов отличаются от таковых у арктических. Из-за своего разнообразного рациона проникающие в Арктику бореальные виды потенциально могут изменить структуру трофических сетей в Северном Ледовитом океане, увеличивая количество кормовых взаимодействий и взаимосвязь между бентосным и пелагическим компонентами экосистем [22].

Полученные результаты в экспедициях «Арктика-2018» и «Трансарктика-2019» могут подтверждать ранее высказанную гипотезу о прогнозируемом увеличении биомассы эвфаузиид в Арктике и переходе этой группы из состояния «псевдопопуляции» к активному размножению при дальнейшем увеличении теплосодержания АВ [23]. В 2018 г. в макропланктоне северо-западной части Восточно-Сибирского моря была отмечена крупная бореальная эвфаузиида *Meganyctiphanes norvegica*. Данный вид эвфаузиид до настоящего времени был отмечен лишь для района бассейна Нансена и его дальнейшее проникновение на восток может говорить о продвижении видов бореального происхождения вдоль склона морей Сибирского шельфа [23].

Заключение

Результаты, полученные в ходе проведения морских исследований в последние годы, выявили аномальное состояние термохалинного состояния российских арктических морей и атлантической водной массы, являющейся одним из основных источников тепла в Арктике, способных оказывать влияние на ледяной покров и морские экосистемы. При этом абсолютные значения аномалий температуры поверхности воды и атлантической водной массы достигли в 2019 г. максимума за всю историю инструментальных наблюдений.

Продолжение морских наблюдений – таких, как «Трансарктика» в 2019 г., охватывающих все российские арктические моря за один навигационный сезон, – позволит восстановить программу государственного мониторинга загрязнения и состояния природной среды российских арктических морей, повысить точность прогнозирования и пространственно-временную детализацию рассчитываемых параметров с помощью математических моделей, что приведет к улучшению качества гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в Арктике, а также позволит исследовать отклик морских экосистем на происходящие глобальные

климатические изменения и прогнозировать их развитие в будущем.

Введение в эксплуатацию ледовой самодвижущейся платформы «Северный полюс» позволит полу-

чить уникальную информацию о состоянии глубоководной части СЛО, особенно в наименее изученный зимний период.

Литература

1. М.С. Махотин, В.В. Иванов
Труды Гидрометцентра России, 2016, **361**, 169.
2. Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. 2012 год, под ред. И.Е. Фролова, РФ, Санкт-Петербург, ААНИИ, 2013.
3. M. Janout, J. Hölemann, B. Juhls, T. Krumpen, B. Rabe, D. Bauch, C. Wegner, H. Kassens, L. Timokhov
Geophys. Res. Lett., 2016, **43**, 264. DOI: 10.1002/2015GL066565.
4. J.A. Hölemann, S. Kirillov, T. Klage, A. Novikhin, H. Kassens, L. Timokhov
Polar Res., 2011, **30**, 6425. DOI: 10.3402/polar.v30i0.6425.
5. M.A. Janout, J. Hölemann, T. Krumpen
J. Geophys. Res. Oceans, 2013, **118**, 563. DOI: 10.1029/2011JC007731.
6. M.A. Janout, J. Hölemann, L. Timokhov, O. Gutjahr, G. Heinemann
J. Geophys. Res. Oceans, 2017, **122**, 6630. DOI: 10.1002/2017JC013159.
7. M.A. Janout, Y. Aksenov, J.A. Hölemann, B. Rabe, U. Schauer, I.V. Polyakov, S. Bacon, A. C. Coward, M. Karcher, Y.-D. Lenn, H. Kassens, L. Timokhov
Geophys. Res. Oceans, 2015, **120**, 4925. DOI: 10.1002/2014JC010635.
8. Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области. 2019, под ред. И.Е. Фролова, РФ, Санкт-Петербург, Изд. ААНИИ, 2020.
9. I.V. Polyakov, A.V. Pnyushkov, M.B. Alkire, I.M. Ashik, T.M. Baumann, E.C. Carmack, I. Goszczko, J. Guthrie, V.V. Ivanov, T. Kanzow, R. Krishfield, R. Kwok, A. Sundfjord, J. Morison, R. Rember, A. Yulin
Science, 2017, **356**, 285. DOI: 10.1126/science.aai8204.
10. I.V. Polyakov, T.P. Rippeth, I. Fer, M.B. Alkire, T.M. Baumann, E.C. Carmack, R. Ingvaldsen, V.V. Ivanov, M. A. Janout, S. Lind, L. Padman, A. V. Pnyushkov, R. Rember
J. Climate, 2020, **33**(18), 8107. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0976.1.
11. I.V. Polyakov, T.P. Rippeth, I. Fer, T.M. Baumann, E.C. Carmack, V.V. Ivanov, M. A. Janout, L. Padman, A. V. Pnyushkov, R. Rember
Geophys. Res. Lett., 2020, **46**, 1. DOI: 10.1029/2020GL089469.
12. T.M. Baumann, I.V. Polyakov, L. Padman, S. Danielson, I. Fer, M. Janout, W. Williams, A.V. Pnyushkov
Scientific Data, 2020, **7**, 275. DOI: 10.1038/s41597-020-00578-z.
13. В.В. Иванов
В Опыт системных океанологических исследований в Арктике, под ред. А.П. Лисицына, М.Е. Виноградова, Е.А. Романкевич, РФ, Москва, Научный мир, 2001, с. 76–91.
14. В.В. Иванов, И.Е. Фролов, К.В. Фильчук
Проблемы Арктики и Антарктики, 2020, **66**(3), 246. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266.
15. V.A. Ivshin, A.G. Trofimov, O.V. Titov
ICES J. Marine Sci., 2019, **76**(Suppl. 1), i3–i9. DOI: 10.1093/icesjms/fsz159.
16. M. Fossheim, E.M. Nilssen, M. Aschan
Marine Biol. Res., 2006, **2**(4), 260. DOI: 10.1080/17451000600815698.
17. M. Fossheim, R. Primicerio, E. Johannesen, R.B. Ingvaldsen, M.M. Aschan, A.V. Dolgov
Nature Clim. Change, 2015, **5**(7), 673. DOI: 10.1038/nclimate2647.
18. L.L. Jorgensen, R. Primicerio, R.B. Ingvaldsen, M. Fossheim, N. Strelkova, T.H. Thangstad, I. Manushin, D. Zakharov
Mar. Ecol. Progr. Ser., 2019, **608**, 1. DOI: 10.3354/meps12803.
19. S. Kortsch, R. Primicerio, F. Beuchel, et al., P.E. Renaud, J. Rodrigues, O.J. Lønne, B. Gulliksen
Proc. Natl Acad. Sci. USA., 2012, **109**(35), 14052. DOI: 10.1073/pnas.1207509109.
20. P. Dalpadado, K.R. Arrigo, S.S. Hjøllø, F. Rey, R.B. Ingvaldsen, E. Sperfeld, G.L. van Dijken, L.C. Stige, A. Olsen, G. Ottersen
PLoS One, 2014, **9**(5), e95273. DOI: 10.1371/journal.pone.0095273.
21. P. Dalpadado, R.B. Ingvaldsen, L.C. Stige, B. Bogstad, T. Knutsen, G. Ottersen, B. Ellertsen
ICES J. Mar. Sci., 2012, **69**(7), 1303. DOI: 10.1093/icesjms/fss063.
22. A. Frainer, R. Primicerio, S. Kortsch, M. Aune, A.V. Dolgov, M. Fossheim, M.M. Aschan
Proc. Natl Acad. Sci. USA, 2017, **114**(46), 12202. DOI: 10.1073/pnas.1706080114.
23. НИОКТР Арктическая трансполярная система в переходных климатических условиях, Отчет об исследованиях (заключительный), под рук. В.В. Иванова, рег. ЦИТИС №ГР AAAA-A20-120032490157-4, РФ, СПб, ААНИИ, 2020, 298 с.

AARI Modern Oceanographic Researches in the Arctic and Their Main Results*

RAS Corresponding Member, Professor,
Scientific Director of Arctic and
Antarctic Research Institute
38 Bering Str.,
Snct. Petersburg, 199397, Russia

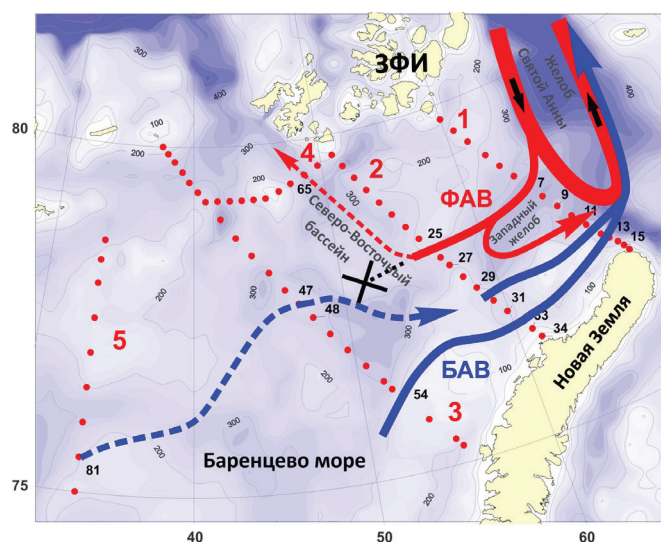


Fig. 2. Scheme of Atlantic waters (AW) circulation in the northeastern part of Barents Sea. FAW – Fram branch of AW; BAW – Barents Sea branch of AW [1].

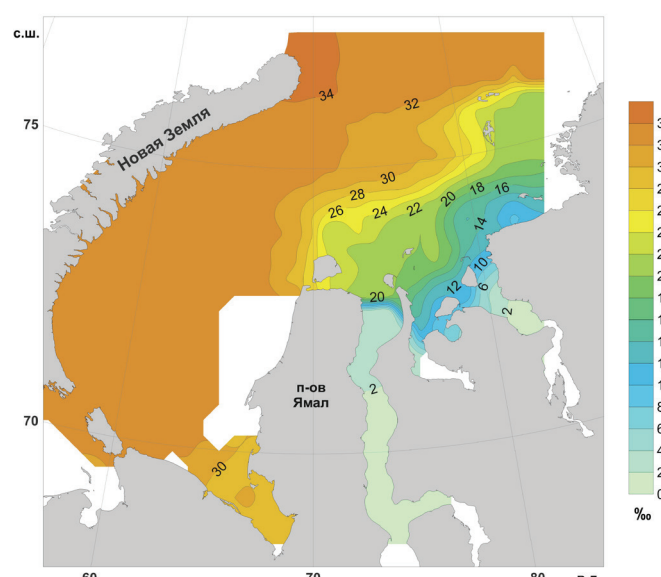


Fig. 3. Distribution of surface salinity in the Kara Sea according to the results of the “Yamal-Arktika-2012” expedition [2].

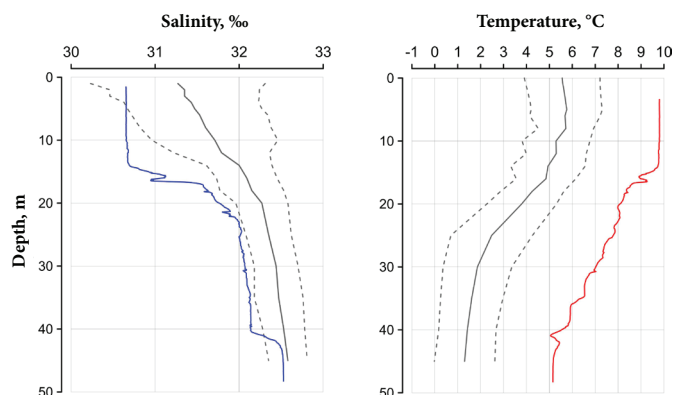


Fig. 4. Vertical distribution of salinity and water temperature in the central part of the Chukchi Sea in August 2019. Colored curves show the values obtained by the “TransArctica-2019 Expedition. Stage 4”. The gray solid and dotted curves show the mean values and the range of standard deviations calculated over the period 1950–2000 using the database of thermohaline characteristics (BDTC) of the AARI [8].

References

1. M.S. Makhotin, V.V. Ivanov
Proc. Hydrometeorol. Res. Ctr. Russian Federation [Trudy Gidromettsentra Rossii], 2016, **361**, 169 (in Russian).
2. Obzor gidrometeorologicheskikh protsessov v Severnom Ledovitom okeane. 2012 god [Review of Hydrometeorological Processes in the Arctic Ocean. Year 2012], Ed. I.E. Frolov, RF, Saint Petersburg, AARI Publ., 2013 (in Russian).
3. M. Janout, J. Hölemann, B. Juhls, T. Krumpfen, B. Rabe, D. Bauch, C. Wegner, H. Kassens, L. Timokhov
Geophys. Res. Lett., 2016, **43**, 264. DOI: 10.1002/2015GL066565.
4. J.A. Hölemann, S. Kirillov, T. Klagge, A. Novikhin, H. Kassens, L. Timokhov
Polar Res., 2011, **30**, 6425. DOI: 10.3402/polar.v30i0.6425.
5. M.A. Janout, J. Hölemann, T. Krumpfen
J. Geophys. Res. Oceans, 2013, **118**, 563. DOI: 10.1029/2011JC007731.
6. M.A. Janout, J. Hölemann, L. Timokhov, O. Gutjahr, G. Heinemann
J. Geophys. Res. Oceans, 2017, **122**, 6630. DOI: 10.1002/2017JC013159.
7. M.A. Janout, Y. Aksenov, J.A. Hölemann, B. Rabe, U. Schauer, I.V. Polyakov, S. Bacon, A. C. Coward, M. Karcher, Y.-D. Lenn, H. Kassens, L. Timokhov
Geophys. Res. Oceans, 2015, **120**, 4925. DOI: 10.1002/2014JC010635.
8. Obzor gidrometeorologicheskikh protsessov v Severnoy polyarnoy oblasti. 2019 [Review of Hydrometeorological Processes in the North Polar Region. 2019], Ed. I.E. Frolov, RF, Saint Petersburg, AARI Publ., 2020 (in Russian).
9. I.V. Polyakov, A.V. Pnyushkov, M.B. Alkire, I.M. Ashik, T.M. Baumann, E.C. Carmack, I. Goszczko, J. Guthrie, V.V. Ivanov, T. Kanzow, R. Krishfield, R. Kwok, A. Sundfjord, J. Morison, R. Rember, A. Yulin
Science, 2017, **356**, 285. DOI: 10.1126/science.aai8204.
10. I.V. Polyakov, T.P. Rippeth, I. Fer, M.B. Alkire, T.M. Baumann, E.C. Carmack, R. Ingvaldsen, V.V. Ivanov, M. A. Janout., S. Lind, L. Padman, A. V. Pnyushkov, R. Rember
J. Climate, 2020, **33**(18), 8107. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0976.1.
11. I.V. Polyakov, T.P. Rippeth, I. Fer, T.M. Baumann, E.C. Carmack, V.V. Ivanov, M. A. Janout., L. Padman, A. V. Pnyushkov, R. Rember
Geophys. Res. Lett., 2020, **46**, 1. DOI: 10.1029/2020GL089469.
12. T.M. Baumann, I.V. Polyakov, L. Padman, S. Danielson, I. Fer, M. Janout, W. Williams, A.V. Pnyushkov
Scientific Data, 2020, **7**, 275. DOI: 10.1038/s41597-020-00578-z.
13. V.V. Ivanov
In Opyt sistemnykh okeanologicheskikh issledovaniy v Arktike [Experience of Systemic Oceanological Research in the Arctic], Eds A.P. Lisitsyn, M.E. Vinogradov, E.A. Romankevich, RF, Moscow, Nauchny Mir Publ., 2001, pp. 76–91 (in Russian).
14. V.V. Ivanov, I.E. Frolov, K.V. Filchuk
Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2020, **66**(3), 246. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266.
15. V.A. Ivshin, A.G. Trofimov, O.V. Titov
ICES J. Marine Sci., 2019, **76**(Suppl. 1), i3-i9. DOI: 10.1093/icesjms/fsz159.
16. M. Fossheim, E.M. Nilssen, M. Aschan
Marine Biol. Res., 2006, **2**(4), 260. DOI: 10.1080/17451000600815698.
17. M. Fossheim, R. Primicerio, E. Johannesen, R.B. Ingvaldsen, M.M. Aschan, A.V. Dolgov
Nature Clim. Change, 2015, **5**(7), 673. DOI: 10.1038/nclimate2647.
18. L.L. Jorgensen, R. Primicerio, R.B. Ingvaldsen, M. Fossheim, N. Strelkova, T.H. Thangstad, I. Manushin, D. Zakharov
Mar. Ecol. Progr. Ser., 2019, **608**, 1. DOI: 10.3354/meps12803.
19. S. Kortsch, R. Primicerio, F. Beuchel, et al., P.E. Renaud, J. Rodrigues, O.J. Lønne, B. Gulliksen
Proc. Natl Acad. Sci. USA., 2012, **109**(35), 14052. DOI: 10.1073/pnas.1207509109.
20. P. Dalpadado, K.R. Arrigo, S.S. Hjollo, F. Rey, R.B. Ingvaldsen, E. Sperfeld, G.L. van Dijken, L.C. Stige, A. Olsen, G. Ottersen
PLoS One, 2014, **9**(5), e95273. DOI: 10.1371/journal.pone.0095273.
21. P. Dalpadado, R.B. Ingvaldsen, L.C. Stige, B. Bogstad, T. Knutsen, G. Ottersen, B. Ellertsen
ICES J. Mar. Sci., 2012, **69**(7), 1303. DOI: 10.1093/icesjms/fss063.
22. A. Fraier, R. Primicerio, S. Kortsch, M. Aune, A.V. Dolgov, M. Fossheim, M.M. Aschan
Proc. Natl Acad. Sci. USA, 2017, **114**(46), 12202. DOI: 10.1073/pnas.1706080114.
23. NIOKTR Arkticheskaya transpolyarnaya sistema v perekhodnykh klimaticeskikh usloviyakh, Otchet ob issledovaniyakh (zaklyuchitelny) [R&D The Arctic Transpolar System in Transient Climatic Conditions, Research Report (final)], supervis. V.V. Ivanov, CIT&S No. AAAA-A20-120032490157-4, RF, Saint Petersburg, AARI, 2020, 298 pp. (in Russian).