

## МОРСКИЕ АРКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРОЕКТУ АВЛАП/NABOS: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

С 2002 по 2021 год ученые ААНИИ совместно с коллегами из Международного арктического научно-исследовательского центра (International Arctic Research Center, IARC, США) выполняли программу долговременного мониторинга состояния вод бассейнов Нансена и Амундсена (Nansen Amundsen Basins Observation System — NABOS). В русской транскрипции проект имел название АВЛАП (Атлантические воды в море Лаптевых). Главной целью программы АВЛАП/NABOS (<https://uaf-iarc.org/nabos/>) являлось исследование роли процессов трансформации вод атлантического происхождения на материковом склоне по пути их следования от пролива Фрама к морю Лаптевых в формировании современных климатических изменений в Арктике. Реализация проекта АВЛАП/NABOS совпала по времени с быстрыми изменениями параметров ледяного покрова Северного Ледовитого океана (СЛО), и в первую очередь с изменениями, произошедшими в окраинных морях евразийского сектора Арктики. Расширение районов с открытой водой и удлинение сезона таяния создало благоприятные условия для проведения широкомасштабных морских экспедиционных исследований. Важную роль при этом сыграло сотрудничество ученых из разных стран, которые внесли свой вклад в части научной экспертизы и внедрения передовых технологий в исследовательский процесс. «Катализатором» целенаправленных морских исследований в Арктике в начале XXI века стал Международный полярный год (МПГ 2007/08), инициатором проведения которого выступил известный российский ученый и общественный деятель Артур Николаевич Чилингаров. В ходе подготовки и проведения МПГ 2007/08 международные научные группы выполнили скоординированные исследования в 40 морских и 60 сухопутных экспедициях, результаты которых были положены в основу более чем 200 научных проектов по различным направлениям наук о Земле, среди которых был и проект АВЛАП/NABOS.

В начале XXI века наблюдения/измерения в экспедициях на специально оснащенных научно-исследовательских судах по-прежнему составляют основу информации о состоянии вод и льдов СЛО. Судовые измерения основных параметров морской воды — температуры и электропроводности — производятся при помощи глубоководных зондирующих устройств — STD (Conductivity — Temperature — Depth). Наиболее распространенными среди них являются STD-зонды SeaBird ([www.seabird.com/](http://www.seabird.com/)). Традиционная стратегия океанографических наблюдений включает вертикальные зондирования в последовательных точках, составляющих океанографический разрез. В дополнение к приборам, измеряющим базовые параметры, STD-зонды также могут быть оснащены датчиками для определения прозрачности воды, растворенного кислорода и др. Одновременно с зондированием выполняется отбор проб воды на заданных глубинах с целью дальнейшего лабораторного анализа для определения комплекса гидрохимических и гидробиологических параметров. В условиях СЛО реализация описанной стратегии наблюдений осложняется наличием постоянного ледяного покрова, создающего непреодолимые препятствия для научно-исследовательских судов, не предназначенных для ледовой навигации. Решение этой проблемы путем использования ледоколов и/или судов усиленного ледового класса резко повышает себестоимость получаемых данных с учетом

финансовых затрат на судовое время, топливо и оснащение необходимой измерительной аппаратурой. Помимо логистических проблем, недостатком информации, получаемой на океанографических разрезах, является ее эпизодический характер. В оптимальном случае повторения одного и того же разреза в течение продолжительного интервала времени имеется возможность оценить временную изменчивость измеряемых параметров и описываемых этими параметрами процессов. Однако даже в этом случае изменения на временном масштабе от нескольких дней до сезона не разрешаются в данных наблюдений, поскольку проведение экспедиций в СЛО, как правило, ограничено несколькими летними месяцами, когда наблюдается максимальное сезонное сокращение площади и толщины ледяного покрова.

Более перспективный подход, который активно начал внедряться в практику в свободных ото льда районах Мирового океана с конца прошлого века, заключается в использовании долговременных автономных буйковых станций (АБС), осуществляющих непрерывную регистрацию параметров морской среды. При этом возможны две разные методики. Одна из них заключается в организации непрерывных наблюдений в фиксированной точке пространства, т. е. со стационарным расположением измерительных приборов. Другой способ основан на свободном дрейфе измерительных приборов под действием ветра и течений. На математическом языке первый подход может быть классифицирован как «эйлеров» (Леонард Эйлер), сфокусированный на измерениях параметров среды в точке, через которую перемещается среда, а второй как «лагранжев» (Жозеф Луи Лагранж), предполагающий наблюдения в процессе движения. В СЛО применение описанных методик наблюдений началось в 2000-х годах и связано с именами наших выдающихся соотечественников, начавших свою научную карьеру в стенах ААНИИ: Игоря Валентиновича Полякова — создателя проекта АВЛАП/NABOS, в основу которого была положена идея использования долговременных заякоренных притопленных автономных буйковых станций (ПАБС) в ключевых районах Арктического бассейна, и Андрея Юрьевича Прошутинского, предложившего технологию вмораживаемых автоматических профилометров (Ice Tethered Profilers — ITP: <https://www2.who.edu/site/itp/>) (см. фото). Практическая реализация обеих технологий стала возможна благодаря развитию технических средств, обеспечивающих установку ПАБС на глубине 50–100 м подо льдом, ее поиск и подъем в условиях сплошного ледяного покрова (в первом случае) и постановку ITP на ледяном покрове с устойчивой связью со спутником для приема и передачи информации в береговые центры (во втором случае).

Наблюдения, полученные в экспедициях АВЛАП/NABOS в 2002–2021 годах с применением обеих описанных технологий долговременного мониторинга состояния морской среды, оказались уникальными. За 20 лет было выполнено около 50 годичных/двухгодичных постановок ПАБС, 75 % из которых прошли успешно и завершились подъемом приборов и получением данных измерений. На основе собранной информации удалось не только зафиксировать сам факт значительного потепления атлантических вод Евразийского бассейна в 2000-е годы, но и установить пульсационный характер



Постановка долговременной заякоренной ПАБС в экспедиции АВЛАП/NAVOS-2006 (слева) и вмораживаемого автоматического профилометра (ИТР) в экспедиции АВЛАП/NAVOS-2013 (справа). Фото из архивов ААНИИ

распространения тепловых волн от пролива Фрама в Арктическом бассейне, а также выделить характеристики сезонного цикла в ряде ключевых районов<sup>1</sup>.

Были сделаны оценки скорости распространения атлантических вод и установлены характерные сроки фазового запаздывания тепловых волн, распространяющихся из района Северной Атлантики.

В 2013–2021 годах в условиях устойчивого изменения ледового режима Арктического бассейна и окраинных морей СЛО были выявлены новые, ранее не наблюдавшиеся тенденции изменений гидрологического режима, вызванные значительным сокращением морского ледяного покрова после 2007 года. На основе анализа и обобщения результатов исследований по программе АВЛАП/NAVOS и ряда других международных проектов, включая российско-германский проект «Изменчивость арктической трансполярной системы» (CATS, 2017–2020), удалось установить, что расширение зон открытой воды летом и возрастание продолжительности безледного сезона в окраинных морях и прилегающей части Арктического бассейна обеспечивают постепенную перестройку процессов в верхнем слое океана и полярной тропосфере, что в итоге может привести к необратимым климатическим сдвигам.

Результаты экспедиционных исследований по проекту АВЛАП/NAVOS и других международных арктических экспедиций в XXI веке документально подтвердили, что изменения климата в Арктике происходят значительно быстрее, чем в среднем по планете, вследствие так называемого эффекта «арктического усиления». Быстрое повышение планетарной температуры воздуха в 1990-е годы уже привело к «скачкообразному» (на климатическом масштабе времени) изменению ледового режима СЛО — переходу к пониженной площади ледяного покрова на пике сезонного минимума (в сентябре) в среднем на  $23 \pm 8\%$  от средней климатической нормы за имеющийся ряд спутниковых наблюдений (1979–2019). Следствием этого стало несбалансированное тепловое воздействие на границе атмосферы и океана на водную толщу. В силу большой инерционности океана это воздействие начало проявляться не мгновенно, а по прошествии нескольких лет. В ряде недавних публикаций по

результатам международных программ АВЛАП/NAVOS и CATS были сформулированы базовые закономерности начавшихся в 2010-е годы изменений в характере гидрометеорологических процессов в российских арктических морях и прилегающей глубоководной части Арктического бассейна. Установлено, что в 2010-е годы возросло обратное тепловое воздействие океана на ледяной покров и арктическую атмосферу. Это воздействие выражается в усилении направленного к поверхности океана теплового потока из промежуточного слоя вод атлантического происхождения — так называемая «атлантификация Арктики»<sup>2</sup> — и в возрастании количества тепла, накапливаемого верхним слоем океана в летний сезон и отдаваемого в атмосферу в последующий зимний сезон<sup>3</sup>.

Указанные изменения с высокой степенью вероятности имеют ряд далеко идущих последствий для других гидрометеорологических параметров. В условиях пониженной ледовитости активизация положительной обратной связи в системе «океан–лед–атмосфера» за счет альбедного механизма способствует формированию «сезонной памяти» в системе и дальнейшему сокращению арктического ледяного покрова с вероятными последствиями для климатических и погодных условий в арктических морях и на прилегающих к СЛО континентах. Более поздние сроки начала ледообразования в море Лаптевых (задержка в 2020 году составила около 1 месяца) уже заметно влияют на вертикальную структуру вод, что было установлено по данным зимних наблюдений, выполненных в 2019 году в международной экспедиции «Трансарктика-2019»<sup>4</sup>.

Согласно прогнозам глобальных климатических моделей, опубликованным в 5-м оценочном докладе МГЭИК

<sup>1</sup> Иванов В.В., Репина И.А. Влияние сезонной изменчивости атлантической воды на ледяной покров Северного Ледовитого океана // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 1. С. 73–82

<sup>2</sup> Ivanov V.V., Repina I.A. Mid-winter anomaly of sea ice in the Western Nansen Basin in 2010s // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. P. 012024.

<sup>3</sup> Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E. Arctic Sea Ice Decline in the 2010s: The Increasing Role of the Ocean-Air Heat Exchange in the Late Summer // Atmosphere 2019. V. 10. P. 184.

<sup>4</sup> Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Yu., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Syoemin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V., Kovalev S.M., Turyakov A.B. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V "Akademik Tryoshnikov" // Arctic and Antarctic Research. 2019. V. 65 (3). P. 255–274.

(IPCC, 2014: [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/)), переход к сезонному ледяному покрову в СЛО ожидается к концу текущего века. Однако в последние годы ученые осторожно предсказывают переход к сезонно-безледному СЛО уже в 2035–2050 годах. Основанием для подобных прогнозов является гипотеза о возрастании роли положительных обратных связей в климатической системе, вследствие значительного сокращения объема арктического морского льда<sup>6</sup>.

Принципиальным при этом является то, что сокращение площади морского льда и его утоньшение, изначально вызванное повышением температуры воздуха, стало «спусковым механизмом», обеспечившим интенсификацию обратных связей, которые в условиях преобладания толстого сплоченного льда либо вообще не проявлялись, либо были малоэффективными. В случае сохранения наблюдаемых темпов отступления ледяной кромки, можно ожидать, что уже в ближайшие 5–10 лет большинство российских арктических морей будет свободным ото льда в течение одного-двух месяцев в году. Необходимо также подчеркнуть, что уменьшение летней площади ледяного покрова происходит не монотонно. Например, между годами с аномально низкой летней площадью льда (2007, 2012, 2016, 2020) наблюдалось частичное восстановление ледяного покрова, включая его толщину, например в 2021 году.

В условиях быстрых изменений параметров ледяного покрова возрастающая технологическая нагрузка на природную среду Арктики предъявляет повышенные требования как к качеству информации о параметрах среды, так и к скорости доступа к информации. По сути, речь идет о внедрении автоматизированной технологии мониторинга состояния параметров среды на акватории СЛО. Под мониторингом в данном контексте понимается следующая последовательность операций: (1) измерения, (2) оперативная передача данных в приемные центры, (3) обработка и анализ данных и (4) обобщение результатов анализа и их представление для потребителей информации. Данная схема информационных потоков вполне очевидна и успешно реализована, например, для метеорологической информации в России (Росгидромет) и за рубежом (национальные метеорологические службы). В СЛО наличие ледяного покрова существенно ограничивает возможность ее внедрения в практику из-за принципиальной проблемы совмещения непрерывных контактных измерений в трех средах (приземном слое атмосферы, ледяном покрове и водной толще) с оперативной передачей информации в приемные центры.

В последние несколько лет развитие новых методов и технологий в смежных областях знаний позволило вплотную подойти к решению данной проблемы. Этому способствовало:

- массовое внедрение в практику наблюдений автономных приборов, позволяющих производить непрерывные измерения параметров среды, и систем связи, обеспечивающих оперативную доставку пользователям результатов измерений;

- совершенствование технологий долговременного автономного функционирования стационарных и плавучих платформ сбора и передачи данных в морях с сезонным и постоянным ледяным покровом;

- создание полуавтономных и дистанционно управляемых носителей измерительных устройств, способных преодолевать значительные расстояния (до сотен километров) под водой, обеспечивая измерение параметров

<sup>6</sup> Иванов В.В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 407–434..

вдоль маршрута движения, хранение и передачу получаемой информации;

- увеличение дальности и надежности передачи/приема информации под водой с использованием акустического канала связи;

- расширение сети искусственных спутников Земли (ИСЗ), обеспечивающих оперативную ретрансляцию данных о параметрах среды в специализированные центры обработки информации;

- увеличение флота специально оборудованных научно-исследовательских судов (ледоколов и имеющих повышенную ледопрободимость), способных выполнять операции по развертыванию/подъему различных измерительных комплексов при наличии ледяного покрова.

Решение задачи мониторинга природной среды СЛО принципиально возможно на пути интеграции вышперечисленных методов и технологий. На сегодняшний день определенные успехи в этом направлении достигнуты в США и странах Евросоюза. Также в последнее десятилетие заметно возросла активность стран дальневосточного региона (Япония, Южная Корея, Китай) в арктических исследованиях. Учитывая комплексность и масштабность задачи мониторинга СЛО, ее достижение требует объединения усилий специалистов из разных стран в различных областях знаний и технологий. В стремительно меняющихся современных международных взаимоотношениях роль Российской Федерации (РФ) в такого рода партнерстве могла бы стать доминирующей, учитывая следующие важные положения:

- большая часть арктических морей, где наблюдаемые изменения наиболее значимы, расположена в пределах Исключительной экономической зоны (ИЭЗ) РФ;

- РФ обладает самым мощным в мире ледокольным флотом, способным решать задачи по установке/снятию измерительных комплексов в любой точке СЛО;

- российские научно-исследовательские институты Академии наук и учреждения Росгидромета имеют богатый опыт системных исследований в Арктике, включая уникальные технологии организации наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс» (СП);

- в 2022 году ожидается ввод в эксплуатацию ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) под эгидой Росгидромета, с которой планируется продолжить на качественно новом технологическом уровне наблюдения, выполнявшиеся на дрейфующих станциях СП;

- в 2022–2024 годах Росгидрометом планируется развертывание опорной сети морских метеорологических наблюдений на базе поверхностных дрейфующих буев в морях евразийского шельфа и прилегающей части Арктического бассейна.

Несмотря на такие благоприятные предпосылки, существует заметное отставание РФ от развитых западных стран в области создания приборной базы и применения передовых технологий организации наблюдений, в первую очередь с плавучих стационарных и дрейфующих автономных платформ и носителей, хотя некоторые новые научно-технологические разработки, создаваемые в настоящее время в РФ, опережают зарубежный уровень и востребованы в зарубежных научных проектах. С учетом этого, инвестирование средств в создание/развитие отечественных измерительных приборов и технологий комплексной обработки и анализа больших данных с применением современных методов численного моделирования является эффективным ответом научного сообщества для достижения приоритетов научно-технического развития РФ и выхода на передовой уровень в морских исследованиях Арктики.

*В.В. Иванов (МГУ им. М.В. Ломоносова, АНИИ)*