УДК 551.463.6+551.464.5(268)

Поступила 20 января 2010 г.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОРСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ АРКТИКИ В XXI ВЕКЕ

канд. геогр. наук И.М.АШИК, канд. геогр. наук С.А.КИРИЛЛОВ, д-р геогр. наук А.П.МАКШТАС, д-р. физ.-мат. наук В.Н.СМИРНОВ, рук. ВАЭ В.Т.СОКОЛОВ, д-р физ.-мат. наук Л.А.ТИМОХОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, ashik@aari.ru

В статье приведена краткая информация о морских экспедиционных исследованиях, проводившихся ААНИИ в период МПГ 2007/08, даны основные результаты анализа водных масс и диагностики состояния вод Северного Ледовитого океана в начале XXI века, высказаны предположения о причинах формирования аномальной структуры водных масс. Также приведены краткие сведения об исследованиях физики ледяного покрова, атмосферы и теплового баланса на основе наблюдений на дрейфующих станциях СП, рассмотрены основные результаты этих исследований.

Ключевые слова: Международный полярный год, Северный Ледовитый океан, морская экспедиция, термохалинные условия, температура воды, соленость воды, водные массы, физика льда, динамические процессы в ледяном покрове, физика атмосферы, тепловой баланс.

1. ВВЕДЕНИЕ

В конце прошлого века начались существенные изменения арктической климатической системы. В 1990-х гг. произошло увеличение циклонической составляющей полярной завихренности и аномалии среднегодовых значений температуры воздуха в широтной зоне 72–85° с.ш. стали положительными [4]. Также изменился знак тренда средней солености поверхностного слоя: в Канадском бассейне осолонение 1950–1980-х гг. сменилось распреснением, а в зоне трансарктического дрейфа – распреснение уступило место осолонению [14]. Ледовитость арктических морей (АМ), которая увеличивалась с 60-х гг. прошлого столетия, в конце столетия начала стремительно уменьшаться [15]. В период 1989–1993 гг. произошло значительное увеличение температуры атлантических вод (АВ) в Арктическом бассейне (АБ). Однако в конце 1990-х гг. и в первые годы текущего столетия наметилась определенная стабилизация поступления атлантических вод в Арктический бассейн и изменился режим атмосферной циркуляции над Арктикой. Казалось, что природная среда Арктики исчерпала свой аномальный импульс и климатическая система Арктики вот-вот начнет возвращаться к прежнему состоянию. Поэтому было чрезвычайно важно организовать наблюдения за состоянием Северного Ледовитого океана (СЛО) в намечающийся переходный период.

Важность и актуальность мониторинга акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) не вызывает сомнения. В течение советского периода Россия осуществляла постоянное слежение за состоянием СЛО. С 1948 по 1993 г. в окраинных морях Сибирского шельфа и в Арктическом бассейне в зимний период с помощью самолетных экспедиций ежегодно выполнялись океанографические съемки, круглогодично производились океанографические наблюдения на дрейфующих станциях «Северный полюс», в арктических морях осуществлялись океанографические наблюдения судами экспедиций «Ледовый патруль». Регулярные наблюдения и развитие теории гидрологического и ледового режима позволили обеспечить трассу Северного морского пути надежной информацией о текущих процессах и морскими прогнозами различной заблаговременности, что оказало немаловажное влияние на эффективность управления хозяйственными операциями в Арктике в 50-80-х гг. прошлого столетия. Результаты наблюдений обеспечили России приоритет в исследованиях СЛО, что нашло отражение в изданных в стране в это время «Атласе Северного Ледовитого океана» (1980) и «Атласе Арктики» (1985), имеюших общепризнанное научное и практическое значение. В дальнейшем на основе доступных российских и зарубежных океанографических данных были рассчитаны поля объективного анализа, составившие основу российско-американского электронного климатического «Океанографического Атласа Северного Ледовитого океана» (1997, 1998). Таким образом, к концу прошлого столетия был достигнут определенный прогресс в понимании основных черт циркуляции и трансформации водных масс СЛО и их связи с процессами во внешней климатической системе. Однако с 1991–1993 гг. из-за экономических трудностей экспедиционные исследования в арктических морях значительно сократились, а мониторинг Арктического бассейна был полностью прекращен.

Для восстановления морской наблюдательной сети России и в целях активного участия России в подготовке и проведении Международного полярного года (МПГ 2007/08) в 2003 г. была организована Высокоширотная арктическая экспедиция (ВАЭ) ААНИИ Росгидромета, выполняющая работы в труднодоступных районах Центральной Арктики и прилегающих морях СЛО на основе заложенного в программе исследований ВАЭ комплексного подхода, объединяющего в едином цикле деятельность дрейфующих станций «Северный полюс», морские экспедиционные исследования, работу летных океанографических отрядов, взаимодействие с береговыми наблюдательными комплексами и системами, автоматическими дрейфующими комплексами. В 2003 г., благодаря взаимодействию ААНИИ и Центра пропаганды, развития территории Арктики и Антарктики «Полюс», были возобновлены отечественные научные исследования в высоких широтах Арктики на дрейфующих льдах Арктического бассейна в круглогодичном цикле. Решение об организации дрейфующей станции СП-32 было принято коллегией Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. В последующие годы программа исследований в Арктическом бассейне получила развитие на дрейфующих станциях СП-33 в 2004 г. и СП-34 в 2005 г.

В 2007-2009 гг. в соответствии с национальной программой участия России в Международном полярном годе, подготовленной Росгидрометом, на акваториях Арктического бассейна СЛО и его морей были осуществлены морские высокоширотные экспедиции (рис. 1 цв. вклейки) по программам «Арктика-2007» (июль-сентябрь 2007 г.) и «Арктика-2008» (август-сентябрь 2008 г.) на НЭС «Академик Федоров» ААНИИ Росгидромета; «Баркалав-2007» (июль-октябрь 2007 г.) и «Баркалав-2008» (август-октябрь 2008 г.) на НИС «Иван Петров» Северного УГМС; проведены комплексы специальных и попутных исследований с бортов атомных ледоколов «Россия», «Ямал» и «50-лет Победы»; выполнены наблюдения летного океанографического отряда; организованы и выполнены уникальные долговременные комплексные многоплановые программы исследований на научно-исследовательских дрейфующих станциях «Северный полюс-35» и «Северный полюс-36» в центральной части Арктического бассейна, ледовых базах ААНИИ (май-август 2007 г.) и «Барнео» (апрель 2007 и 2008 гг.); выполнены работы летных сезонных отрядов ВАЭ. С борта НЭС «Академик Федоров» и во время работ летных отрядов ВАЭ установлены на акватории Арктического бассейна более 20

автоматических дрейфующих измерительных систем, ведущих наблюдения за состоянием океана, атмосферы и льда в районах их дрейфа и оперативно передающих данные в международные центры.

В рамках международных проектов были проведены экспедиционные исследования по российско-американской программе «АВЛАП-НАБОС» (на борту НИС «Виктор Буйницкий», сентябрь—октябрь 2007 г. и ледокола «Капитан Драницин», август—сентябрь 2008 г.) и российско-германской программы «Исследование системы моря Лаптевых» (на НИС «Иван Петров» в августе 2007 и 2008 гг.). Также осуществлялись попутные наблюдения за состоянием и динамикой ледников в западном секторе Арктики в снабженческих рейсах НЭС «Михаил Сомов» в 2007—2008 гг.

Главными целями, объединяющими все перечисленные исследования, были:

 – определить современное состояние компонент арктической климатической и экологической системы Арктического бассейна СЛО;

 – углубить представления о механизмах формирования климатических и экологических процессов в Арктике;

 получить надежную оценку климатических изменений в высокоширотной Арктике относительно периода 1950—1970-х гг., наиболее освещенного предшествующими наблюдениями, и определить их связь с глобальными изменениями естественной и антропогенной природы;

 усовершенствовать технологии мониторинга природной среды в Арктике, учета арктических процессов в глобальных моделях погоды и климата, повысить надежность расчетов и прогнозов их изменений.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как уже отмечалось, изменения арктической климатической системы в конце прошлого века в ее морской части наиболее аномально проявились в изменении состояния атлантических вод. Вторжение атлантических вод было продолжительным, и повышение их температуры превысило все значения за исторический период наблюдений. Однако в 2002–2003 гг. максимальные температуры атлантических вод в Евразийском суббасейне стали уменьшаться, что послужило поводом для предположения о наступлении переходного периода и возврата состояния СЛО к ранее наблюдавшимся.

Океанографические исследования 2003-2004 гг. позволили получить новую информацию о состоянии СЛО и установить новую фазу изменений состояния атлантических вод в Арктическом бассейне. Наблюдения на дрейфующей станции СП-32 в декабре 2003 г. – феврале 2004 г. в районе хребта Гаккеля зарегистрировали повышение максимальных температур АВ (рис. 2). Отмеченное изменение температуры можно было бы объяснить тем, что траектория дрейфа СП прошла через некую изолированную структуру с более высокой температурой воды на глубине 200-400 м. Например, пересекла ранее неизвестную струю фрамовской ветви АВ. Однако феномен потепления был подтвержден во время российско-американской экспедиции АВЛАП/НАБОС-2004, выполнявшей океанографические разрезы на материковом склоне в северной части моря Лаптевых. Более того, анализ годовых записей вертикальных профилей температуры воды, полученных на ПБС, установленной в сентябре 2003 г. в этом районе, позволил установить две волны повышения температуры АВ – в феврале и июне 2004 г. Сравнительный анализ показал, что в 2004 г. температура АВ в Евразийском суббассейне в большинстве районов превышала величины максимальных температур, которые были измерены в 1990-х годах прошлого столетия. Данные наблюдений последующих морских экспедиций, измерения на ПБС и дрейфующих буях ITP в 2005-2006 гг. подтвердили факт нового потепления вод атлантического происхождения в Евразийском суббасейне. Это дало основание предположить, что начался еще более мощный импульс потепления Арктики [15].



Рис. 2. Средние для слоя 5–10 м температура воды (*a*), соленость (*в*) и аномалии температуры (*б*) и солености воды (*г*) в 2007 г. относительно ряда 1950–1989 гг. в летний период

Анализ данных наблюдений, как в Арктическом бассейне, так и в Северо-Европейском бассейне, показал, что главной причиной этого феномена явилась интенсификация поступления более теплых атлантических вод в Арктический бассейн через пролив Фрама. Действительно, на океанографическом разрезе от м. Свиной в Норвежском море в 1998 г. наблюдался пик температуры атлантических вод, зафиксированный через год в проливе Фрама, а еще через 3,5 года – в северной части моря Лаптевых. Положительная аномалия, прошедшая через пролив Фрама в 1999 г., к 2006 г. заполнила практически весь Евразийский суббассейн. Вторая положительная аномалия АВ, наблюдавшаяся в проливе Фрама в 2004–2005 гг., была зафиксирована в 2006 г. между Шпицбергеном и ЗФИ и в желобе Святой Анны. Заметим, что в Норвежском море после ряда циклических изменений температура атлантических вод в 2009 г. вновь стала повышаться. Учитывая, что причиной роста температуры АВ в Арктике является прежде всего поступление теплых вод из Норвежского моря, есть все основания полагать, что в ближайшие годы температура воды в слое АВ в Арктике в целом будет увеличиваться.

В поверхностном слое СЛО в течение в 2003–2006 гг. наблюдались разнонаправленные аномалии температуры и солености, которые были связаны, прежде всего, с особенностями поверхностной океанической циркуляции и влиянием атмосферных процессов. Но вдоль материкового склона от пролива Фрама до моря Лаптевых в течение всего периода наблюдений в поверхностном слое отмечались положительные аномалии солености воды. Несомненно, что такая устойчивая положительная аномалия поверхностной солености обусловлена, прежде всего, влиянием AB, которые в этом районе непосредственно подстилают поверхностный слой.

Выше указывалось, что начало МПГ 2007/08 и пик комплексных морских исследований в СЛО совпали с необычным развитием гидрометеорологических процессов в Арктике. Благодаря этому были получены новые данные о состоянии СЛО в зимний и летний сезоны, которые позволили не только описать структуру экстремального состояния Арктического бассейна и арктических морей, но и предоставили уникальную возможность оценить изменчивость океанографических условий в период действия экстремальных процессов.

В начале июня 2007 г. температуры в поверхностном слое в южной части котловины Подводников по данным экспедиции «ТрансАрктика-2007» были близки к средним климатическим значениям. Однако уже во второй половине июня появились признаки аномального развития гидрологических процессов в СЛО. В августе-сентябре сформировались поля поверхностных температур и солености, которые не наблюдались в предыдущие годы. Самая высокая за весь исторический период наблюдений в Арктическом бассейне температура +4,15 °C на горизонте 5 м (при средней климатической величине -1,5 °C) была измерена 31 августа экспедиций на НЭС «Академик Федоров» в южной части хребта Менделеева. 21 сентября в северной части моря Лаптевых экспедицией на НИС «Виктор Буйницкий» была зарегистрирована высокая (+ 2,38 °C) температура приповерхностного слоя при малой (27,77 ‰) солености, не характерная для этого времени года, поскольку по наблюдениям прошлых лет дата прекращения таяния льда на широтах около 80° приходится на 22 августа, а с середины сентября устанавливаются уже зимние процессы. Анализ весенне-летнего периода 2007 г. показал, что в районе котловины Подводников продолжительность периодов накопления тепла и распреснения за счет таяния льда поверхностного слоя на широте 80° составила не менее 3 месяцев, а амплитуда сезонных изменений температуры воды составила около 4,0 °C, что в 15–20 раз больше средних значений для этого района. Амплитуда сезонных изменений поверхностной солености была порядка 2.0–2.5 ‰, что в пять раз больше средних значений изменчивости для этого района.

Пространственная структура сформировавшихся аномалий в поверхностном слое наиболее ярко проявляется на картах распределения температуры и солености в августе—сентябре 2007 г. Для анализа структуры термохалинных аномалий в Арктическом бассейне и арктических морях были построены карты пространственного распределения температуры и солености и вычислены климатические аномалии температуры и солености по отношению к средним полям для летнего сезона 1950—1989 гг. При этом основное внимание при анализе уделялось поверхностному 10-метровому слою, характеризующемуся наибольшими значениями аномалий в 2007 г. (рис. 2).

Установлено, что в Амеразийском суббассейне летом 2007 г. наблюдались необычно высокие температуры воды и сформировались значительные положительные аномалии, достигавшие +3 °С. Площадь, занятая водами с температурой выше -1,0 °С, была больше климатической почти в 2 раза. На большей части Евразийского суббассейна температура воды в поверхностном слое была близка к средней климатической. Однако в северных частях Баренцева и Карского морей и в восточной части моря Лаптевых также наблюдались положительные аномалии температуры поверхностного слоя величиной до 2–5 °С. Кроме аномального термического состояния, 2007-й год характеризовался экстремальными значениями в поле поверхностной солености. Так, существенное распреснение наблюдалось на всей акватории Амеразийского бассейна и акваториях прилегающих к нему арктических морей. При этом выделялись две обширные области больших отрицательных аномалий от $-4~\%_0$ до $-6~\%_0$. Первая область располагалась в южной части котловины Подводников и прилегающей части Сибирского шельфа с центром 80° с.ш. и 160° в.д., а вторая – в Канадской котловине. В то же время на севере Баренцева и Карского морей и прилегающей части Евразийского суббассейна в поверхностном слое было зафиксировано значительное осолонение с аномалиями, достигавшими 2 $\%_0$, а в море Лаптевых и 6 $\%_0$ (рис. 2).

Одной из основных причин формирования такой термохалинной структуры на поверхности являются особенности атмосферной циркуляции. Начиная с весны 2007 г. в этом регионе преобладали ветра южных направлений и наблюдались большие положительные аномалии температуры воздуха, достигавшие в августе значений +8 °С [4]. Усиление теплообмена на границе вода-лед-атмосфера вызвали интенсивное таяние ледяного покрова и отступление кромки льдов на север. В восточной части СЛО ото льда освободилась огромная акватория, в предшествующие годы всегда покрытая дрейфующими льдами. В конце сентября граница ледяного покрова отодвинулась далеко на север, в отдельных местах достигая широты 87°. Образование огромной акватории, свободной ото льда, способствовало значительному прогреву поверхностного слоя воды. Атмосферное воздействие было главным, но не единственным фактором. На интенсификацию выноса льдов из морей Чукотского, Восточно-Сибирского и Бофорта оказало влияние положение антициклонического круговорота вод, который в последние годы сместился к югу от центра Канадской котловины, а интенсивность его выросла, что способствовало ускорению выноса льда по периферии антициклонического круговорота в сторону островов Канадского архипелага. Наблюдения в последующие 2008 и 2009 гг. показали, что структура поля аномалий температуры и солености, за исключением некоторых районов, оставалась подобной лету 2007 г., но величины аномалий стали меньше. Это позволило предположить, что имеется тенденция к возвращению термохалинного состояния поверхностного слоя к среднему климатическому уровню.

Для получения оценок изменений, произошедших в толще океана от поверхности до глубинных слоев, нами был выполнен объемный анализ всех имеющихся глубоководных океанографических данных летних сезонов 2007 г. и 1970–1979 гг. Временной интервал 1970–1979 гг. интересен тем, что в этот период наблюдалось ослабление потока AB в Арктический бассейн, а их максимальная температура была самой низкой за весь период инструментальных измерений [14]. Результаты объемного анализа масс позволили получить ряд важных оценок. Были получены средневзвешенные значения температуры и солености для всего объема СЛО для лета 2007 г. (+1,2 °C и 34,06 ‰) и для периода 1970–1979 гг. (+0,82 °C и 34,25 ‰). Из этих оценок следует, что с 70-х годов прошлого века до начала текущего столетия воды Арктического бассейна и прилегающих арктических морей потеплели на 0,38 °C, а их соленость уменьшилась на 0,19 ‰.

Двумерные гистограммы функции распределения объемов вод для различных градаций температуры и солености для лета 2007 г. и летнего сезона 1970–1979 гг. существенно различаются (рис. 3). Аномальные процессы в поверхностном слое, которые обсуждались выше, нашли отражение в том, что в интервалах температур от -0.4 °C до +1.0 °C и солености воды меньше 30,0 ‰ функция распределения аномалий имеет положительные значения. Значительная трансформация объемов вод произошла для градаций температур и солености (0,0/+1,50 °C; 31,0/32,0 ‰) и (0,0/+1,0 °C; 32,0/33,0 ‰). Объем вод первой градации в 2007 г. увеличился



Рис. 3. Гистограммы объемов вод СЛО (вертикальная ось, объем воды в метрах на единицу площади) в пределах выделенных градаций температуры и солености (горизонтальные оси), построенные для летнего сезона 1970–1979 гг. (а) и 2007 г. (б); (в) – гистограмма разности объемов вод между 2007 г. и 1970–1979 гг., на которой белому цвету соответствуют большие объемы в 2007 г., а черный цвет показывает, что объем вод в данной градации температуры и солености в 2007 г. был меньше, чем в 1970–1979 гг.

в 5 раз по отношению к уровню 1970-х. Основное изменение произошло за счет увеличения объема прогретых поверхностных баренцевоморских и летних тихоокеанских вод. При этом объем вод второй градации в 2007 г. в относительных единицах, наоборот, уменьшился почти в 9 раз.

Общий объем атлантических вод с температурой выше 0 °С и соленостью более 34,6 ‰ в 2007 г. вырос на 22 % по сравнению с 1970–1979 гг. В то же время внутри АВ произошло изменение парциальных объемов вод для разных градаций температуры. Так, объем атлантических вод температурой от 0 °С до 2 °С уменьшился, а объем вод с температурой более 2,0 °С значительно увеличился. Такая существенная перестройка термохалинной структуры слоя АВ явилась следствием увеличения за последние два десятилетия (особенно начиная с 2003–2004 гг.) поступления более теплых и менее соленых, относительно средней многолетней величины, атлантических вод в Арктический бассейн [15].

Изменения коснулись и более глубоких слоев. Объем промежуточных вод с температурой от -0,4 °C до 0 °C и соленостью более 34,6 ‰ в 2007 г. уменьшился на 30 %. Нижележащие донные воды стали несколько теплее и менее солеными, что подтверждает выявленную ранее закономерность повышения температуры донных вод при повышении температуры атлантических вод в Арктическом бассейне [3]. Оценить объем донных вод в 2007 г. не представилось возможным в силу ограниченного числа данных измерений глубже 1500 м.

Главные результаты океанографических исследований Арктики:

1. Получены новые данные о состоянии СЛО в различные сезоны года.

2. На основе данных наблюдений выделены крупнейшие температурные и соленостные аномалии в различных районах Арктического бассейна и морей Сибирского шельфа и описана структура этих аномалий. Выполнен анализ изменчивости океана в начале XXI века и получены оценки экстремальных изменений Арктического бассейна и морей Сибирского шельфа.

4. Получены оценки изменений, произошедших в толще океана от поверхности до самых глубоких слоев за последние 30 лет, и установлено, что в СЛО произошла существенная перестройка термохалинной структуры.

5. Установлена сопряженность повышения температуры AB, увеличения солености поверхностного слоя на материковом склоне Шпицберген, ЗФИ, Северная Земля и уменьшения солености поверхностного слоя на оси Трансарктического дрейфа.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКИ И МЕХАНИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МОРСКИХ ЛЬДАХ

В Арктическом бассейне одновременно протекают физико-механические процессы различного масштаба и различной интенсивности, приводящие к образованию дискретной структуры ледяного покрова. Хаотические флюктуации скорости дрейфа разных масштабов могут обуславливать турбулентное движение льдов. Значительные ускорения при подвижках возникают при сравнительно кратковременных взаимодействиях ледяных полей при сжатии или сдвиге. Ромбовидные и мозаичные фрагменты ледяных образований, наблюдаемых на аэрофотоснимках и спутниковых изображениях, образуют самоподобные фигуры, линейные размеры которых составляют от сотен метров до сотен километров. Характеру относительных деформаций и разломов во льду способствует неоднородность физико-механических характеристик ледяного покрова.

Выявление связи динамических процессов в морских льдах (приливные подвижки, неравномерность дрейфа льдов, сжатие и торошение, возникновение протяженных разломов) с явлениями в атмосфере и океане является сложной задачей. Тем не менее длительные ряды подспутниковых инструментальных наблюдений и спутниковые изображения льда представляют достоверную физическую основу для изучения физических процессов, происходящих в ледяном покрове, включая распределения ромбовидных форм ледяных образований, которые с закономерной периодичностью возникают независимо от наблюдаемых метеоусловий. При исследовании физико-механических процессов и перестройки структурных связей ледяного покрова основным материалом являются результаты наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс»: сжатие и торошение льдов, автоколебательные процессы во льдах, поверхностные волны во льдах океана, воздействие внутренних волн и турбулентных потоков на ледяной покров, явление самоподобия и самоорганизации морских льдов [5, 6].

Физика и механика деформирования и разломов ледяного покрова изучается на основе инструментальных измерений параметров деформаций и напряжений в ледяных полях с помощью деформометров, акселерометров, наклономеров, GPS-приемников и на основе спутниковых изображений льда. При наблюдениях на дрейфующих льдах изучались процессы, характеризующие механику деформирования ледяного покрова различного масштаба: напряжения, относительные деформации и смещения, горизонтальные ускорения ледяных полей при подвижках и др. [10, 16]. Временной диапазон наблюдаемых динамических процессов в ледяных полях составлял от единиц секунд до полусуток. Пространственные масштабы – от десятков метров до сотен километров. При обработке данных использовались гидрометеорологическая информация и спутниковые изображения ледяного покрова. При анализе результатов учитывались разделы механики сплошных и дискретных сред, физики колебаний и волн в различных средах, теория самоподобных процессов пространственных изображений льда и временных рядов его динамики.

Полученные в большом объеме данные наблюдений отклика ледяного покрова на динамические процессы в океане и атмосфере подвергались статистической обработке для выявления корреляционных связей, получения прогностических элемен-



Рис. 4. Отклик ледяного покрова СЛО на динамические процессы в океане и атмосфере: *a* – метеопараметры и характеристики льда: 1 – скорость дрейфа льда; 2 – длительный наклон ледяного поля; 3 – волны зыби в диапазоне периодов 15–30 с; 4 – внутренние волны в диапазоне до 30 мин.; 5 – упругие колебания при сжатии и торошении льда в диапазоне 0,1–20 Гц; б) направление ветра и траектория дрейфа льда. Дрейфующая станция «Северный полюс-35», 2008 г.

тов, определения физических свойств крупномасштабных явлений в системе атмосфера—лед—океан. Скорость и направление дрейфа льда, уровень волн зыби, проявление внутренних волн и турбулентных потоков, автоколебания при сжатии льдов, разломы и торошения сравнивались с локальными метеопараметрами (рис. 4).

Изгибно-гравитационные волны в ледяном покрове

В ледяном покрове СЛО присутствует фон изгибно-гравитационных волн в диапазоне периодов от 1 до 60 с. Волны возникают от воздействия ветра, при торошении льдов, от волн на открытой воде. Амплитуда волн зыби при длине волны

один километр может иметь амплитуду до нескольких сантиметров. Слабое затухание зыби позволяет регистрировать ее во льдах от штормовых районов в Атлантике, в Баренцевом и в Беринговом морях. Волны зыби с периодом 25–35 с отмечаются на всех дрейфующих станциях. На рис. 4 повышения уровня волн зыби зарегистрированы при минимальной скорости ветра и дрейфа.

Особенно следует выделить свободные волны в морском льду при обрушении выводных ледников и образовании айсбергов. В этом случае колебания припая с периодом до 100 с могут продолжаться в течение нескольких часов. Волновые поля от айсбергов представляют значительный интерес при решении прикладных задач освоения арктического шельфа [8]. При изгибных деформациях ледяного поля могут возникать протяженные трещины во льду.

Внутренние волны во льдах СЛО

Колебания ледяного покрова в диапазоне периодов от единиц минут до часа и более возбуждаются короткопериодными гравитационными внутренними волнами океана и турбулентными течениями. Под действием внешних сил (атмосферных возмущений, приливов, килей торосов и айсбергов) в стратифицированной по плотности водной среде возникают колебания с амплитудами до десятков и сотен метров. При мгновенном воздействии или при резком прекращении силы внутренние волны рассматриваются как свободные [1]. Если внутренние волны становятся неустойчивыми и разрушаются, то образуются мелкомасштабные турбулентные пятна. Все эти процессы в зависимости от их энергии воздействуют на ледяной покров. Реакция льда на это воздействие проявляется в образовании колебательных и волновых процессов с фазовыми скоростями внутренних волн (около 0,5 м/с). Повышение фона внутренних волн отмечено при различных метеопараметрах (рис. 4).

В настоящее время имеются длительные ряды параметров как внутренних волн, так и схожих с ними хаотических колебаний ледяного покрова. Внутренние волны тесно связаны с океанской турбулентностью, когда в зоне максимального градиента плотности происходит резкое изменение скорости течений. Можно предположить, что за счет энергии внутренних волн и турбулентных потоков возникает эффективная сила, создающая соответствующую реакцию ледяного покрова.

Механические автоколебания в морских льдах

В консолидированном ледяном покрове океана обнаружены периодические горизонтальные подвижки, относящиеся к классу автоколебательных процессов. Одним из явлений, возникающих в реальных диссипативных системах типа морского льда, является генерация незатухающих механических колебаний, период и амплитуда которых не зависят от характера внешнего воздействия, а определяются свойствами самой системы. Длительность и интенсивность автоколебательных подвижек с трением по разрыву во льдах характеризуют реологию льда, механику разрушения, формируют структуру излучаемых волн. Периодические пульсации ледяного поля могут превратиться в квазигармонические автоколебания — процесс стабильного скольжения с трением по разрыву. При этом переход от разрывных колебаний к почти синусоидальным зависит от относительной скорости смещения стенок разрыва (рис. 5). При помощи пространственной расстановки приборов отмечены циклические сдвиговые подвижки, охватывающие области размером до нескольких километров [7].

На основании наблюдений на дрейфующих льдах получены обобщенные характеристики явления. Для поддержания автоколебаний не требуется периодических воздействий извне. Внешним источником энергии ледовых автоколебаний являются силы сжатия, обусловленные ветром и поверхностными течениями океана. Демпфирующим механизмом служат силы трения и сцепления относительно границ разрыва в ледяном покрове. Процесс взаимодействия проявляется в регу-



Рис. 5. Типичная запись периодической горизонтальной подвижки по разрыву в ледяных полях при сжатии льдов. Циклические импульсы t_1 обусловлены явлением stick slip, переходящим в t_2 стабильное скольжение; периодичность следования импульсов 4–5 с; частота автоколебаний 0,9 Гц. Длительность автоколебательных процессов достигает десятков минут

лярной повторяемости процессов накопления и сброса напряжений, характеризующих релаксационные свойства льда в большом масштабе. Автоколебания могут служить прогностическим признаком ледового сжатия и торошения. Процесс автоколебаний служит ярким примером явления самоорганизации в хаосе временных ледовых событий.

Физическое самоподобие в морских льдах

Ряд признаков пространственных и временных изменяющихся параметров – самоподобие на различных масштабных уровнях, наличие автоколебательных процессов – указывают на то, что совокупность трещин, разрывов, гряд торосов и других нарушений сплошности льда является иерархической самоорганизующейся системой. Такой подход создает новое направление на основе статистической физики фракталов: самоподобие и самоорганизация ледовых образований. Понятие самоподобного множества произвольных геометрических объектов (фрактальных размерностей) включает совокупность линий, поверхностей, имеющих сильно изрезанную форму. Самоподобие по пространству и времени – это статистически одинаковый характер структуры геофизической среды в разных пространственновременных масштабах рассмотрения.

Автомодельность процесса структурообразования иллюстрируется количественными соотношениями между размерами области разрушения и энергией процесса разрушения. Переход между уровнями осуществляется «катастрофическим» путем и сопровождается появлением самоподобных структур. Характерной формой блоков в результате разрушения ледяного покрова является параллелограмм или ромб (рис. 6). Когерентность геометрических размеров указывает на возникновение самоорганизации и самоподобия [9]. Об активной жизни ледяного покрова свидетельствуют колебания и волны во льдах в широком диапазоне периодов.

Значение пространственно-временной корреляции ледовых образований состоит в потенциальной возможности предсказывать изменение во времени некоторой зоны ледяного покрова, исходя из предшествующей эволюции системы на другом масштабном уровне. Таким образом, масштабная инвариантность динамики морских льдов в сочетании с их фрактальной организацией позволяют рассматривать ледяной покров как самоорганизующийся фрактальный пространственновременной домен. Установление взаимосвязи между характером деформаций льда различного масштаба и особенностями его дрейфа является основой для совершенствования моделей динамического поведения морского льда, используемых



Рис. 6. Самоорганизация форм морского льда. В выделенном фрагменте снимка NOAA видны ледовые образования ромбовидной формы; размер стороны «ромба» около 200 км

в задачах ледовых прогнозов, а также при изучении природы катастрофических явлений локального и геофизического масштабов.

Основные результаты, полученные в ходе исследований физики и механики морского льда:

1. Физико-механические свойства ледяного покрова и перестройка его макроструктуры связаны с локальной и мезомасштабной динамикой льдов, ледовыми автоколебаниями, поверхностными и внутренними волнами.

2. Связь физики и механики морского льда с процессами в океане и атмосфере позволяет выявлять природу экстремальных ледовых явлений, совершенствовать методы прогноза сжатия морских льдов, возникновения разломов и формирования разводий — важных факторов при решении климатических и инженерных задач.

3. Направление изучения динамики морских льдов на основе статистической физики фракталов создает предпосылки для разработки технологии мониторинга состояния льдов мезо- и макромасштаба.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Регулярные экспериментальные исследования физических процессов в атмосфере и ледяном покрове Центральной Арктики имеют длительную историю, начавшуюся в 1950 г., когда была открыта дрейфующая станция «Северный полюс-2». В 1991 г. комплексные гидрометеорологические исследования в СЛО с использованием дрейфующих станций были прерваны до 1997 г., когда в период американского эксперимента «Тепловой баланс поверхности в Арктике» (SHEBA) в течение года было выполнено комплексное изучение системы «атмосфера – морской лед – океан» в районе моря Бофорта и прилегающей части Арктического бассейна. Основное внимание в этом эксперименте было уделено изучению процессов взаимодействия атмосферы и океана при наличии ледяного покрова. Комплексные исследования гидрометеорологических процессов в Центральной Арктике с помощью дрейфующих станций были возобновлены Россией в 2003 г. Несмотря на длительную историю регулярных исследований Арктического бассейна, насчитывающую более 50 лет, можно отметить лишь 4 годичных цикла комплексных наблюдений, позволивших в известной степени описать совместную сезонную эволюцию основных параметров атмосферы, ледяного покрова и верхнего слоя океана. Такие наблюдения были выполнены на дрейфующей станции «Северный полюс-4» в 1956–1957 гг., в период эксперимента «SHEBA» в 1997–1998 гг. и на дрейфующих станциях СП-35, СП-36 в 2007–2009 гг. Преимуществом комплексных наблюдений на СП-35 и СП-36 является полная согласованность наблюдательской программы, выполненной силами ученых одного института (ААНИИ), в противоположность более технически оснащенному, однако гораздо менее скоординированному комплексу наблюдений в период эксперимента SHEBA, в результате которого не было создано даже единого архива данных. В свою очередь, качество данных комплексных наблюдений на СП-4, послуживших прообразом экспериментальных исследований на СП-35, СП-36, соответствовало уровню развития измерительной техники того времени.

На дрейфующих станциях СП-35, СП-36 в период с октября 2007 г. по июль 2008 г. и с октября 2008 г. по август 2009 г. с помощью полуавтоматической метеорологической станции MAWS 110 (Vaisala, Финляндия), представляющей собой комплекс современных метеорологических и актинометрических датчиков, с дискретностью одна минута выполнялись измерения атмосферного давления, скорости и направления ветра на высоте 2 и 10 м, температуры и влажности воздуха на 2 и 8 м, температуры снежно-ледяного покрова на 3 уровнях, коротковолновой и длинноволновой суммарной приходящей и отраженной радиации. Кроме этого, газоанализаторами ЗАО «ОПТЭК» с дискретностью одна минута проводились измерения концентрации озона и углекислого газа в приледном слое воздуха. В период, когда высота солнца составляла более 10°, производились измерения общего содержания озона и интенсивности ультрафиолетовой радиации. Один раз в 3 часа выполнялись визуальные наблюдения облачности (высоты, количества и формы) и состояния подстилающей поверхности и атмосферных явлений. Два раза в сутки выполнялись зондирования атмосферы до высоты 25-30 км с помощью современного комплекса радиозондирования «Vaisala», и эпизодически проводились аэростатные зондирования пограничного слоя атмосферы. С помощью полевых спектрометров «Рамзес» регулярно выполнялись измерения спектрального альбедо снежно-ледяного покрова, спектральные измерения проникающей под лед солнечной радиации. Впервые были выполнены прямые измерения потока углекислого газа на границе снежно-ледяной покров – атмосфера с помощью современного прибора «Licor-8100». Кроме этого по совместной программе АА-НИИ и ГГО производился отбор проб воздуха для химического анализа. Основные виды гидрометеорологических наблюдений, организованных на дрейфующей станции «Северный полюс-35», показаны на рис. 7 цв. вклейки.

На основе проведенных наблюдений в ААНИИ был создан уникальный совместный электронный архив данных аэрологических, аэростатных, метеорологических, интегральных и спектральных радиационных наблюдений, наблюдений за высотой облачности и газовым составом атмосферы, охватывающий период с октября 2007 по август 2009 г.

Информация, содержащаяся в электронном архиве, совместно с полученными на станциях данными об осадках и временной изменчивости толщин снежного и ледяного покрова, была использована как в качестве внешнего форсинга, так и для валидации результатов расчетов, выполненных с помощью разработанной в ААНИИ термодинамической модели морского ледяного покрова, описываемого плоско-параллельными слоями снега и льда [2, 13]. При этом были выполнены численные эксперименты по расчету годового цикла изменения толщин



Рис. 8. Воспроизведение моделью толщин снежного (a, δ) и ледяного (s, c) покрова на дрейфующей станции «Северный полюс-36»: слева – с использованием параметризации альбедо, справа – по измеренному альбедо

снега и льда как при априорно заданном альбедо подстилающей поверхности, так и при альбедо, рассчитанном на основе маршрутных съемок. В качестве начальных условий использовались осредненные значения толщин снега и льда, полученные в результате ледовых съемок на момент высадки станций. Результаты модельных расчетов сравнивались с данными регулярных ледовых съемок, выполнявшихся один раз в 10 суток в период дрейфа каждой из станций. На рис. 8 в качестве примера приведены результаты расчетов временной и изменчивости толщин снежно-ледяного покрова по данным дрейфующей станции «Северный полюс-36».

Анализ результатов моделирования показал, что модель несколько завышает высоту снежного покрова в момент его максимального развития (до 25 %), что, вероятно, связано с недоучетом перераспределения снега под воздействием ветра и его уплотнения [12]. При этом она вполне адекватно описывает процессы таяния снега, особенно при задании альбедо подстилающей поверхности на основании натурных измерений. Расхождение между наблюденным и модельным временем полного исчезновения снежного покрова в последнем случае не превышает двух дней при общей длительности периода таяния снежного покрова порядка 40 дней. Так же адекватно модель описала изменение толщины льда за весь период наблюдений. Расхождение между рассчитанной и измеренной толщинами на момент окончания периода таяния при использовании измеренных значений альбедо поверхности составила 1-2 см при общем изменении толщины ледяного покрова от 1,2 до 2,3 м. Использование априорно заданных в основном варианте модели значений альбедо привело к занижению рассчитанной толщины льда на 10-12 см, что составляет порядка 10 % общего изменения его толщины.

В целом выполненные численные эксперименты продемонстрировали хорошее воспроизведение моделью годового хода толщины льда и снега при реальном атмосферном форсинге. Их успешность во многом объясняется наличием отрицательной обратной связи между турбулентными потоками и длинноволновым радиационным балансом, выявленной по данным натурных наблюдений на дрейфующих станциях и адекватно воспроизведенной в модели. Дальнейшее совершенствование термодинамической модели снежно-ледяного покрова планируется выполнить также путем введения новой параметризации параметра шероховатости, предложенной в работе [11], а также новых параметризаций альбедо подстилающей поверхности и проникающей в ледяной покров и верхний слой океана коротковолновой солнечной радиации, базирующихся на результатах экспериментальных исследований, проведенных на СП-35 и СП-36 в весенне-летние периоды 2008 и 2009 гг. Для указанных характеристик радиационного энергообмена на основе анализа экспериментальных данных получены эмпирические зависимости для различных спектральных интервалов. При этом впервые выявлен суточный ход альбедо снежной поверхности при ясном небе и частичной облачности, составляющий при изменении высоты Солнца от 14 до 20 градусов до 15 % от средней величины альбедо.

Кроме данных о процессах взаимодействия в системе «приледный слой атмосферы – морской ледяной покров – верхний слой океана» на дрейфующих станциях СП-35, СП-36 были получены принципиально новые данные о пространственно-временной изменчивости концентраций углекислого газа и озона в приледном слое атмосферы, а также, впервые, данные о вертикальном распределении концентрации озона в пограничном слое атмосферы в весенний период (период полного разрушения приповерхностного озонового слоя) в его связи со стратификацией пограничного слоя. Указанное направление работ находится на самом переднем крае науки и еще требует своего осмысления.

Выполненные также впервые прямые измерения потока углекислого газа на границе «атмосфера – снежно-ледяной покров» показали слабое выделение углекислого газа поверхностью замерзшего разводья зимой и его поглощение поверхностью снежницы летом. Полученные результаты подтвердили выявленные в ходе гидрохимических исследований на дрейфующей станции СП-35 закономерности обмена углекислым газом между океаном и атмосферой при наличии ледяного покрова, указывающие на то, что в годовом цикле морской ледяной покров обусловливает сток СО₂ из атмосферы.

Данные аэростатных зондирований пограничного слоя атмосферы (до высоты 1,5 км) и аэрологических — до высоты 30 км в настоящее время используются как для анализа изменчивости климата свободной атмосферы СЛО, так и для совершенствования региональной модели прогноза состояния полярной атмосферы, выполняющегося совместно ААНИИ и Гидрометцентром Росгидромета. В этой связи наибольший интерес представляют измеренные впервые в Центральной Арктике параметры струйных течений нижнего уровня и их временная изменчивость на периодах от 30 с до 2–3 ч.

Подводя итоги краткого обзора результатов метеорологических исследований на дрейфующих станциях «Северный полюс-35, 36» следует подчеркнуть, что, наряду с результатами описанных выше специально ориентированных экспериментов, проведенные в период дрейфа на современном оборудовании и высококвалифицированным персоналом стандартные метеорологические наблюдения представляют собой во многом единственную возможность получения информации, необходимой для целей продолжения мониторинга состояния атмосферы Центральной Арктики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доронин Ю.П., Гудкович З.М. Дрейф морских льдов. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 110 с. 2. Макштас А.П., Назаренко Л.С., Шутилин С.В. Модель морского ледяного покрова Арктического бассейна // Математические модели в исследовании динамики океана. Новосибирск.: ВЦ СО АН СССР. 1988. С. 96–116.

3. *Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О.* Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 269 с.

4. Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. 2007 / Под ред. И.Е.Фролова. СПб.: ААНИИ, 2008. 80 с.

5. Патент № 84999 от 25.11.08. Система для определения времени и координат места образования айсбергов. Авторы Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалев С.М.

6. Смирнов В.Н. Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометеоиздат, 1996. 162 с.

7. *Смирнов В.Н.* Особенности динамики и механики деформирования льда Арктического бассейна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 73–84.

8. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Никитин В.А., Шейкин И.Б., Шушлебин А.И. Новые технологии изучения механики и динамики морского льда и получения исходных данных для оценки сил ледового воздействия на берега, дно и сооружения // Труды RAO/GIS OFFSHORE 2009, PROCEEDINGS. Санкт-Петербург 15–18 сентября 2009 г. СПб., 2009. Т. 2. С. 288–293.

9. Смирнов В.Н., Чмель А.Е. Самоподобие и самоорганизация в дрейфующем ледяном покрове Арктического бассейна // Доклады Академии наук. 2006. Т. 5. С. 684–687.

10. Шейкин И.Б., Смирнов В.Н., Ковалев С.М. Оценка точности GPS-измерений на ледяном поле дрейфующей станции СП-33 // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 79. С. 31–44.

11. Andreas E.L., Jordan R.E., Makshtas A.P. Parameterizing turbulent exchange over sea ice: the ice station Weddell results // Boundary-Layer Meteorology. 2005. Vol. 114. P. 439–459.

12. Jordan R.E., Andreas E.L., Makshtas A.P. Heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4 // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. P. 7785–7806.

13. *Makshtas A.P., Shoutilin S.V., Marchenko A.V., Bekryaev R.V.* Dynamic-thermodynamic sea ice model: application to climate study and navigation // J. of Ship&Ocean Technology, 2004. Vol. 8. № 2. P. 20–28.

14. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Timokhov L.A., Bhatt U.S., Colony R.L., Simmons H.L., Walsh D., Walsh J.E., Zakharov V.F. Variability of the intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the last 100 years. // Journal of Climate. 2004. Vol. 17(23). P. 4485–4497.

15. Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fahrbach E., Frolov I.E., Gerdes R., 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., 32, L17605, doi:10.1029/2005GL0237402005. P. 1–4.

16. *Smirnov V.N.* The mechanism of dynamic loads in compressed sea ice during shear failure // Proc. 16th Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions, POAC, Ottawa, Canada, 2001. Vol. 2. P. 421–429.

I.M.ASHIK, S.A.KIRILLOV, A.P.MAKSHTAS, V.N.SMIRNOV, V.T.SOKOLOV, L.A.TIMOKHOV

THE MAJOR RESULTS OF THE SEA-GOING ARCTIC EXPEDITIONS IN THE BEGINNING OF XXI CENTURY

This paper briefly reviews the general information on Russian marine expedition researches during IPY 2007/08 in the Arctic and the major results obtained in these cruises. The authors speculate about the possible factors that are responsible for the forming of sizable anomalies in thermohaline structure both in the surface and intermediate layers. Except the oceanographic results, this paper also reviews the results of observation at the ice-drifting station North Pole including ice-physics, atmospheric researches and the surface heat balance.

Keywords: International Polar Year, Arctic Ocean, marine expedition, thermohaline conditions, water temperature, water salinity, physics of ice, dynamic processes into ice cover, physics of atmosphere, heat balance.

К статье И.М.Ашика, С.А.Кириллова, А.П.Макштаса, В.Н.Смирнова, В.Т.Соколова, Л.А.Тимохова



Рис. 1а. Маршруты высокоширотных экспедиций, осуществлявшихся ААНИИ в 2003-2006 гг.







К статье И.М.Ашика, С.А.Кириллова, А.П.Макштаса, В.Н.Смирнова, В.Т.Соколова, Л.А.Тимохова



Рис. 7. Комплекс метеорологических исследований, проведенных на дрейфующих станциях «Северный полюс-35, 36»