



ОРГАНИЗАЦИЯ ЛЕДОВЫХ РАБОТ В ЭКСПЕДИЦИИ MOSAiC

С 21 сентября 2019 года по 12 октября 2020 года в Центральной Арктике работала международная экспедиция MOSAiC (многопрофильная дрейфующая обсерватория по изучению изменений климата). По масштабу организации (17 стран, более 600 участников) данная экспедиция являлась крупнейшей арктической научной экспедицией в истории. Основной целью работ было исследование климатических процессов в Центральной Арктике для оптимизации глобальных климатических моделей и прогнозов.

Руководство экспедицией осуществлял немецкий институт имени Альфреда Вегенера (АВИ), являвшийся также владельцем главного экспедиционного судна — ледокола «Поларштерн», на котором и осуществлялся годичный дрейф.

Экспедиция MOSAiC была поделена на этапы, между которыми осуществлялось снабжение продовольствием и оборудованием, а также проводилась ротация участников. Начало работ экспедиции описано в статье «Экспедиция MOSAiC — начало» (Российские полярные исследования. 2020. № 3. С. 21–23).

В течение года снабжение осуществляли несколько российских судов: на начальном этапе — «Академик Федоров», затем в декабре 2019-го и феврале 2020 года — «Капитан Драницын», а на завершающем этапе — «Академик Трёшников». Изначально предполагалось разделить экспедицию на 6 этапов, между которыми должна была проводиться ротация участников, но из-за ситуации с вирусом COVID-19 планы пришлось изменить. 3-й этап экспедиции пришлось продлить. Кроме того, на 4-й этап не нашлось судна для снабжения, поэтому «Поларштерну» пришлось дойти до Шпицбергена и провести ротацию с помощью другого немецкого судна, что привело к разрыву в наблюдениях между 3-м и 4-м этапами. В итоге этапов стало 5. Кроме этого, на 4-м этапе льдина, на которой располагался ледовый лагерь MOSAiC, начала разрушаться, продолжение работ стало невозможным. В итоге было принято решение искать новую льдину после ротации.

Ротация перед 5-м этапом проходила в течение трех дней вблизи архипелага Шпицберген. После ее завершения «Поларштерн» отбыл к месту поиска новой льдины. 19 августа судно

достигло Северного полюса, где была сделана короткая стоянка. 20 августа новое место работ было найдено. Размеры, толщина и рельеф льдины оказались подходящими. Начали разворачивать лагерь, провели первые ледовые работы.

Работы продолжались до 20 сентября. Во время обратного следования были сделаны остановки на трех льдинах, где проводились работы океанологов, экологов, биогеохимиков, а также ледовой команды. Также была остановка в течение дня в районе Конгс-фьорда, после чего «Поларштерн» взял курс на Бремерхафен и 12 октября прибыл в порт. На этом экспедиция MOSAiC закончилась.

Организация ледового лагеря

Для выполнения запланированных экспедиционных работ и исследований на льду вокруг «Поларштерна» был организован обширный ледовый лагерь. Под разные виды работ и измерений выделялись различные участки, на которых устанавливалось соответствующее оборудование.

Состояние льдины, на которой проходила экспедиция, в течение года было нестабильным. Во льду возникали трещины, проходили подвижки ледяной поверхности, образовывались новые торосы. Поэтому схема ледового лагеря в течение года менялась. Несколько раз проходили масштабные перестановки, изменение локаций и маршрутов путей.

Новая льдина на 5-м этапе экспедиции была значительно меньше предыдущей, поэтому и ледовый лагерь также получился значительно меньше. Участки под работы и исследования были компактнее и плотнее примыкали друг к другу, что по-своему оказалось неплохо, т. к. упростило доставку оборудования и со-

кратило длину маршрутных путей. Потребовалось значительно меньше времени на развертку и последующее сворачивание ледового лагеря. Снегоходы использовались только для перевозки серьезных грузов. В основном же участники добрались до нужного места работ пешком, а оборудование везли на ручных волокушах. Общая схема ледового лагеря на 5-м этапе показана на рисунке.

Схема нового ледового лагеря на 5-м, заключительном этапе.
Фотосхема М. Николауса



Работы на льду

Все планы работ на льду научного состава обсуждались и согласовывались с руководителями экспедиции. Заранее составлялся перечень работ, списки групп, выходящих на лед, и необходимое оборудование. У каждой группы должен был быть руководитель с рацией для связи с судном и егерь для охраны от медведей. Помимо этого, во время работ на льду постоянно осуществлялись наблюдения с мостика судна. Безопасность участников была одной из главных задач организаторов экспедиции.

На заключительном этапе экспедиции для научных работ был отведен всего один месяц, поэтому темп был выше. Старались провести побольше измерений и взять больше научных образцов для исследования. Основной задачей было провести исследования во время нового ледообразования. Когда оно началось, то стали часто организовывать вечерние работы после общего собрания.

Помимо атмосферных, океанологических, экологических и биогеохимических исследований в экспедиции MOSAiC проводились обширные ледовые работы, которые включали:

- исследование физических свойств льда (температуры, солёности, плотности, текстуры и структуры) с помощью отбора ледяных кернов;
- исследование прочностных характеристик льда;
- измерение толщины льда и снега бесконтактным методом (Transect);
- измерение толщины льда в торосах контактным и бесконтактным методами;
- исследование физических свойств снега (SnowPit);
- подводные исследования нижней поверхности льда с помощью подводного аппарата (ROV);
- удаленное наблюдение за состоянием снежного покрова и льда с помощью набора установленных датчиков (Remote Sensing);
- исследования эволюции снежного покрова с помощью лазерного радара (Lidar);
- измерение толщины льда с помощью замороженных металлических столбов (Stakes);
- исследование оптических характеристик снега и льда;
- наблюдение за ледовой обстановкой с помощью дронов;
- наблюдение за динамикой ледяного покрова с помощью специальной сети установленных датчиков (SIDOS);
- наблюдения за состоянием льдины с вертолета;
- наблюдения за распределением и дрейфом льда с помощью сети буйев.

Некоторые работы велись на протяжении всей экспедиции, некоторые были начаты только ближе к летнему периоду, когда стало светло. Отдельные виды работ в дальнейшем пришлось свернуть из-за нехватки специалистов, в чем свою роль сыграло и распространение COVID-19.

Исследование физических свойств льда методом отбора кернов

Для отбора кернов на анализ физических свойств были выделены участки

ровного льда. Работали двумя группами (одна на однолетнем льду, другая — на двухлетнем). Помимо участников от ледовой команды в работах принимали участие экологи и биогеохимики, которые также брали ледяные керны для своих исследований. Данные виды работ выполнялись на протяжении всей экспедиции. Помимо ровного льда отборы кернов также проводились и в торосах, а на поздних этапах — в снежниках и в разводьях. Среди регулярных работ отбор кернов был самым объемным в экспедиции MOSAiC.

Измерение прочностных характеристик льда

В экспедиции MOSAiC проводились три вида прочностных испытаний льда: измерение локальной прочности, измерение прочности цилиндрических образцов на одноосное сжатие и круглых пластин на центральный изгиб. Для первых двух видов работ использовался специальный комплекс гидравлического оборудования ЛГК, включающий в себя гидростанцию, мультипликатор давления, измерительный блок, скважинный зонд-индентор и пресс. Для измерения локальной прочности применялся зонд-индентор, который погружался на лебедке в выбуренную лунку. На выбранных горизонтах зонд проламывал лед выдвигающимся поршнем. При выдвигании поршня регистрировалось давление в гидросистеме, по которому и вычислялась локальная прочность льда.

Для испытания прочности льда на одноосное сжатие использовался тот же комплекс ЛГК, но с переносным прессом вместо зонд-индентора. Из ледяной поверхности с помощью керноотборника KOVACS в вертикальном и горизонтальном направлениях выбуривались ледяные керны, из которых изготавливались образцы для испытания на прочность. Данные образцы помещались в пресс, где затем раздавливались. В момент разлома образца фиксировалось давление в системе, из которого вычислялась прочность льда на одноосное сжатие.

На 5-м этапе прочностные измерения проходили проще, чем на предыдущих этапах. Погодные условия позволили хранить основную часть оборудования на льду, на том участке, где проводились измерения. Самой сложной работой было выбуривание и последующее извлечение ледяного блока. Для этого приходилось брать добровольцев из других команд.

Измерение толщины льда и снега бесконтактным методом (Transect)

Для измерения толщины льда использовался магнитно-резонансный измеритель толщины льда — GEM-2. Данное устройство устанавливалось в специальные санки с чехлом на молнии и перемещалось в них по льду, непрерывно измеряя его толщину (включая снег) в месте своего нахождения. Для определения географических координат прибора и местоположения относительно судна рядом с судном предварительно расставлялись 2 датчика GPS, с которыми у прибора была непрерывная связь. Для измерения толщины снега использовалось устройство MagnaProbe — ручной измеритель толщины снега. Он представлял собой длинный шест с из-

Измерения толщины снега и льда бесконтактным методом (Transect).
Фото Г. Шпринга



мерителем на конце, подсоединенный к специальному портативному компьютеру. Шест втыкался в снег и по нажатию кнопки производил измерение, которое тут же фиксировалось в компьютере с указанием времени. При этом у компьютера также был встроенный датчик GPS, позволяющий определить местоположение точки измерения и в дальнейшем связать его с точкой измерения толщины льда.

Чтобы увеличить площадь работ и получить более детальную картину распределения толщины, данные работы проводились не на выделенных участках, а по специально проложенному маршруту, проходящему почти по всей площади ледового лагеря. Вследствие глобальных подвижек льда маршруты для данных измерений менялись.

Измерение толщины льда в торосах контактным и бесконтактным методами

Ледяные торосы образуются при разрушении полей морского льда во время сжатия. Верхняя часть тороса, находящаяся над поверхностью льдины, называется парусом, а нижняя часть, находящаяся под ледяной поверхностью, — килем. Киль намного больше паруса и может составлять 90 % объема тороса. И паруса, и кили являются важными элементами шероховатости поверхности льда, которые вызывают турбулентность в атмосфере и океане.

Еженедельно проводились бесконтактные измерения толщины торосов с помощью электромагнитного измерителя GEM-2. Также несколько раз были отобраны керны на анализ физических свойств. На последних этапах стало применяться контактное измерение толщины торосов, которое заключалось в бурении скважин и измерении толщины льда в этих скважинах.

Поскольку состояние льдины не было стабильным, в течение экспедиции расположение торосов на ней менялось. Вследствие этого менялись и локации для измерений толщины. Всего было исследовано 4 тороса на первой льдине и один на второй.

Исследование физических свойств снега (SnowPit)

В данный вид работ входили измерения высоты снежного покрова, вертикального распределения температуры, солености, плотности, количества морской воды, анализ структуры снега, а также инфракрасная съемка снежного покрова.

Для выполнения данных работ в районе ледового лагеря было выделено несколько участков, включавших в себя ровный лед и зоны замерзшего разводья.

В начале работ на выбранной точке измерялась средняя плотность снега на всю толщину с помощью специального измерительного устройства SnowMicroPen. Принцип

Рабочие моменты исследований физических свойств снега (SnowPit).
Фото Д. Вагнера



работы заключался в бурении снежного покрова специальным щупом, измеряющим уровень сопротивления снега бурению. Когда щуп доходит до льда, то автоматически останавливается. При этом рассчитывается высота снега и его плотность по всей высоте. Далее на точке выкапывалась яма, где измерялась температура снега через каждые 3–5 см от поверхности, а через каждые 3 см брались пробы на соленость, которые также предварительно взвешивались на весах в специальной емкости для определения плотности снега. Для измерения количества морской воды из снега на всю толщину отбиралась проба с помощью специального стакана, который затем взвешивался на откалиброванных для этого пружинных весах.

Для исследования структуры снега из снежного покрова брались образцы, которые укладывались в специальные емкости и доставлялись в ледовую лабораторию на судне, где помещались в сканер для анализа.

Данный вид работ проводился на протяжении всей экспедиции.

Подводные исследования нижней поверхности льда с помощью подводного аппарата (ROV)

Работы проводились с помощью подводного аппарата Beast. Для этого был собран тент, внутри него во льду выпиливалась майна, куда опускался аппарат Beast, в котором имелась подводная камера для съемок, а также датчики и механизмы для взятия проб. Аппарат был подключен к установленному в палатке компьютеру, позволяющему наблюдать обстановку под водой в режиме реального времени.

Вследствие ледовых подвижек и разломов лагерь ROV переносился несколько раз. На последнем этапе MOSAiC палатка для наблюдений уже не устанавливалась. Измерения проводились из легкого помещения, в котором хранился аппарат. Майна для погружения находилась рядом на открытом воздухе.

Данные работы проводились в течение всей экспедиции. Было сделано более 70 погружений, во время которых получено много снимков подводной поверхности льда у дрейфующей станции, а также отобрано несколько видов арктического зоопланктона.

Удаленное наблюдение за состоянием снежного покрова и льда с помощью набора установленных датчиков (Remote Sensing)

Наблюдения Remote Sensing проводились на участке льда с установленными датчиками и измерительными приборами для локального и удаленного наблюдения за состоянием снежного покрова и льда в районе дрейфующей станции. Использовалось 10 инструментов из 9 научных институтов. Среди установленных датчиков были

Палатка для подводных исследований ROV.
Фото Ш. Хендрикса



инфракрасная камера, датчик GNSS, различные радиометры и рефлектометры (измерители рассеяния) и другие. Часть датчиков также была установлена на борту «Поларштерна».

Данные наблюдения велись в течение всей экспедиции MOSAiC, по возможности непрерывно в автономном режиме. Однако несколько раз из-за подвижек льда данный участок также приходилось переносить. Из-за этого были перерывы в наблюдениях.

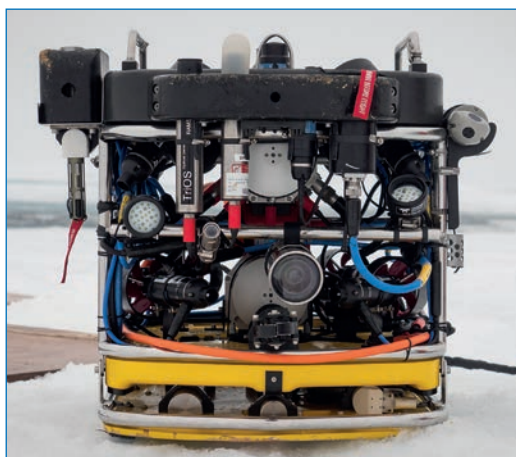
Исследования эволюции снежного покрова с помощью лазерного радара (Lidar)

Lidar-измерения предназначены для исследования эволюции снежного покрова в районе дрейфующей станции с помощью лазерного сканирования.

Суть работ заключалась в установке на льду специального радара на высокой треноге, который сканировал местность с помощью лазера и получал ее картинку с помощью заранее установленных на льду рефлекторов на специальных вешках, вмороженных в лед.

Питание радара осуществлялось от портативного электрогенератора, а управление велось с помощью подключенного персонального компьютера, куда и записывались полученные данные. Во время работы радар вращался на треноге, сканируя окружающую местность лазерным лучом. Для более точной картины сканирование проводилось с нескольких точек.

Для полного цикла сканирования требовалось примерно 1,5–2 дня. Из-за ледовых подвижек участки с установленными рефлекторами меняли свое местоположение, некоторые рефлекторы были поломаны. Работы часто осложнялись сильным ветром и плохой видимостью (снегопадом или туманом). На заключительном этапе данные измерения не проводились.



Аппарат Beast для подводных исследований ROV (верхнее фото) и его погружение в воду (нижнее фото).
Фото М. Николауса

Измерение толщины льда с помощью вмороженных металлических столбов (Stakes)

Stakes-измерения — способ измерения толщины льда в отмеченных точках. Принцип измерений заключался в следующем: во льду пробуривались тонкие лунки, куда помещались металлические тонкие столбы (отсюда и название Stakes) с измерительной шкалой сверху и с опорой на конце. Столбы вмораживались в лед. Во время измерений с помощью специального аппарата через вмороженный столб пропускался электрический ток. Столб нагревался и мог свободно подниматься сквозь лед. Нижний конец столба упирался в границу льда, и по шкале столба измерялась толщина льда в этой точке.

Для выполнения данных работ было выделено 6 участков в разных районах ледового лагеря. Работы проводились раз в 2 недели. К сожалению, после первого этапа из-за подвижек льда четверть столбов пришла в негодность. На заключительном этапе работы не проводились.

Исследование оптических характеристик снега и льда

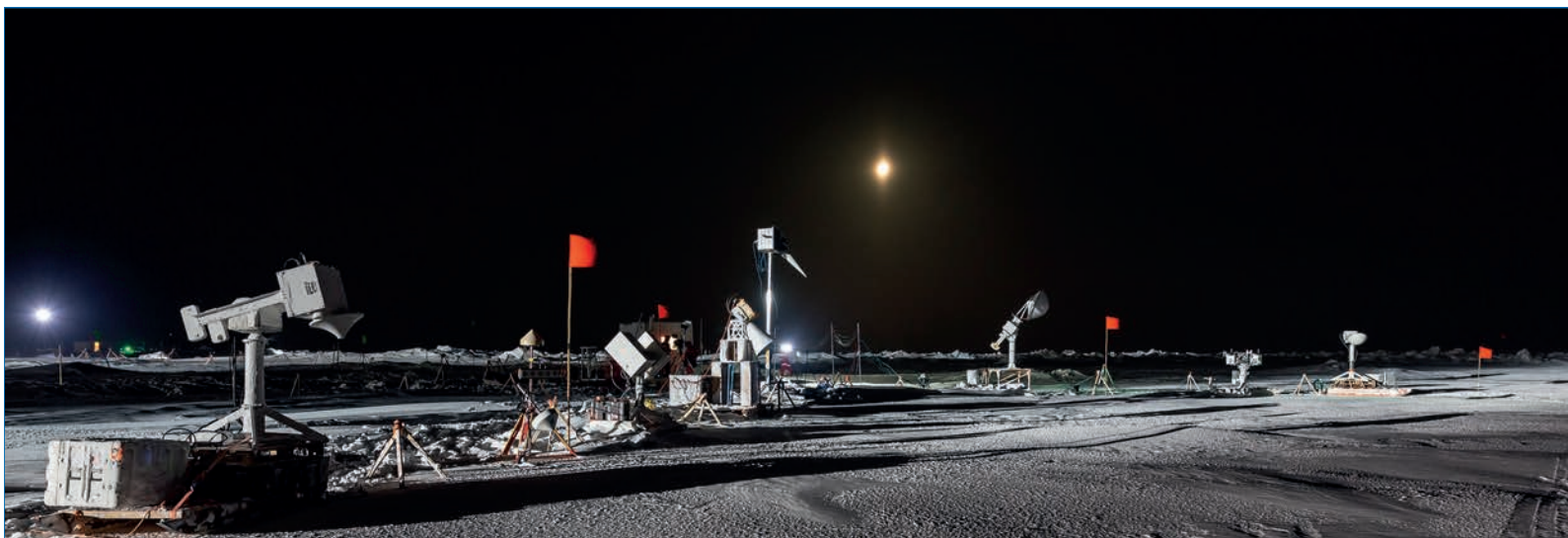
Основной целью оптических измерений было понять, как солнечный свет распределяется снегом и льдом, а также как изменяются оптические свойства снега и льда (альbedo, коэффициент пропускания) во время

ледообразования.

Проводились следующие работы:

- исследования альbedo поверхности;
- стационарные радиационные станции;
- ROV-исследования пропускания света поверхностью;
- измерения с дронов и вертолетов;
- отбор кернов морского льда для определения оптических и текстурных характеристик;

Участок Remote Sensing, декабрь 2019 года. Фото Ш. Хендрикса



- определение профилей оптических свойств;
- измерения гониометрами.

Почти все эти работы проводились на заключительном этапе экспедиции, во время ледообразования.

Измерения спектрального альbedo в основном проводились с помощью спектрорадиометра ASD FieldSpec3, который измерял лучистую энергию в диапазоне 350–2500 нм. Альbedo рассчитывались с использованием отношения падающей (приходящей) энергии к отраженной на каждой длине волны.

Значительное количество измерений проводилось в снежниках с целью оптически охарактеризовать их в локальном масштабе и облегчить масштабирование собранных показателей до данных наблюдений с воздуха и из космоса.

Наблюдение за ледовой обстановкой с помощью дронов

На заключительном этапе экспедиции проводились наблюдения за ледовой обстановкой с использованием специальных радиоуправляемых дронов. Именно с их помощью на последнем этапе составлялись карты льдины, а также проводилось измерение альbedo поверхности.

Наблюдение за динамикой ледяного покрова с помощью специальной сети установленных датчиков (SIDOS)

Для наблюдения за динамикой ледяного покрова в районе дрейфующей станции была развернута система SIDOS (Small-scale Ice Dynamics Observing System). Эта система включала в себя следующие компоненты:

- система лазерного сканирования (Laser strain observatory), предоставленная институтами Dartmouth/CRREL (состоит из лазерного сканера и установленных на льду рефлекторов);
- 3 GNSS-буя, предоставленные университетом Huddersfield;
- 3 портативные сейсмостанции ААНИИ;
- 13 измерителей напряжений во льду (stress-gauges), предоставленные институтами Dartmouth/CRREL и FMI;
- стресс-панели, предоставленные институтами PS HSVA и TUHH;

Подготовка дрона для ледовых наблюдений. Радар на треноге, предназначенный для выполнения Lidar-измерений.

Фото Ю. Регнери



- корабельный радар для наблюдения за масштабными подвижками льда, предоставленный институтом FMI.

Система лазерного сканирования состояла из лазерного сканера TM50 и установленных на льду специальных рефлекторов. При сканировании местности луч отражался от рефлекторов, определялись миллиметровые смещения рефлекторов, и таким образом измерялись микроподвижки ледяного покрова.

Портативные сейсмостанции фиксировали колебания и наклоны ледяной поверхности, позволяя регистрировать различные ледовые события, такие как возникновение трещин, торошение и другие. Данные станции устанавливались в трех точках ледового лагеря. В течение экспедиции места локализации сейсмостанций несколько раз менялись.

Измерители напряжений были установлены во льду в различных местах дрейфующей станции, как вблизи судна, так и на удалении нескольких километров. Данные приборы измеряли вибрации во льду, и по ним определяли давление во льду, делая записи каждую минуту (CRREL) или 10 минут (FMI). Записанные данные скачивались вручную членами ледовой группы. Скачивание данных и замена аккумуляторных батарей выполнялись раз в 2 недели.

Корабельный радар, установленный на носу «Поларштерна», каждые 10 минут выполнял сканирование ледовой обстановки. Дальность — примерно 10 км во все стороны. Область обзора — три четверти круга перед судном. Сектор круга, расположенный за кормой судна, являлся слепой зоной.

Снимки, полученные с ледового радара, давали возможность оценить крупномасштабные изменения ледовой обстановки, такие как крупные трещины, общее сжатие льдины, подвижки отдельных ее частей и т. д. Данные корабельного радара хорошо сочетались с данными других датчиков по динамике, позволяя лучше интерпретировать полученные данные.

Наблюдения за состоянием льдины с вертолета

На дрейфующей станции регулярно велись наблюдения за ледовой обстановкой с вертолета. Осуществлялись полеты к удаленно расположенным наблюдательным станциям, велась разведка и съемка основной

Снимок с корабельного радара MOSAIC 01.11.2019. Размер области 20×20 км.

Фото Я. Хаапала



льдины, на которой располагался ледовый лагерь. Это позволило составить и в дальнейшем корректировать карту льдины. Кроме того, на вертолете была установлена инфракрасная камера, что позволяло оценивать температуру поверхности, а также измеритель альбедо, что позволяло оценивать рельеф поверхности льда. Практически все карты и схемы дрейфующей станции составлены с помощью данных, полученных с вертолета.

Сеть буев для наблюдения за распределением и дрейфом льда

Вокруг дрейфующей станции, а также на удаленно расположенных наблюдательных станциях была установлена сеть специальных SIMBA буев и DTC-буев для отслеживания вертикального распределения температуры и толщины льда в местах установки.

На заключительном этапе экспедиции вокруг основной льдины была развернута небольшая распределенная сеть (DN) буев-дрифтеров — всего 22. Эта сеть использовалась для отслеживания дрейфа льдины и ее окружения и позволяла рассчитывать деформацию морского льда в различных пространственных масштабах.

Экспедиция MOSAiC внесла значительный вклад в изучение Арктики, который еще предстоит оценить. Было собрано огромное количество научных данных,

в работах приняло участие большое количество людей из разных стран. Создана база данных, в которую занесены полученные результаты наблюдений. Анализ данных и обсуждение результатов займет длительное время. Раз в две недели проходят видеоконференции, на которых заинтересованные специалисты обсуждают возникающие вопросы, планируют дальнейшую совместную работу. 28 апреля в рамках Недели Германии в Санкт-Петербурге состоялась конференция «Арктическая экспедиция MOSAiC — измеряя исчезающий мир». На этой конференции российские и немецкие участники экспедиции рассказали про ее цели и ожидаемые результаты, поделились своими впечатлениями от экспедиции. Осенью 2021 года в городе Потсдам (Германия) планируется большая международная научная конференция, посвященная обсуждению результатов, полученных в экспедиции. Российские участники планируют выступить на ней с рядом докладов.

От участия в данной экспедиции и приобретенного опыта у авторов осталась масса приятных впечатлений. Хочется надеяться, что в будущем еще будут полярные экспедиции подобного рода с привлечением специалистов из разных стран и сотрудники ААНИИ также будут принимать в них активное участие.

Н.В. Колабутин, Е.В. Шиманчук (ААНИИ)

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ААНИИ НА СЕВЕРЕ РОССИИ

После масштабного загрязнения земной поверхности в 1961–1964 годах продуктами испытаний ядерных боеприпасов в атмосфере прошло более 56 лет, а после выпадений «чернобыльских» радионуклидов от аварийного блока ЧАЭС — 36 лет. Эти выпадения сформировали основной техногенный фон искусственных радионуклидов (ИРН) в наземной и водной экосистемах Земли, в частности в северных регионах России (Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). М.: ИздАт, 2005; AMAP Assessment 2009: Radioactivity in the Arctic. Oslo, 2010). В настоящее время радиологическая ситуация там является благополучной: продукты питания, получаемые коренным населением охотой на морского зверя, ловлей рыбы и разведением северного оленя, содержат искусственные радионуклиды в концентрациях, которые многократно ниже (Рамзаев П.В., Троицкая М.Н., Дударев А.А. и др. Гигиеническая оценка радиационной обстановки в районах проживания коренных народов Крайнего Севера // Радиационная гигиена: Сб. СПб., 2003. С. 131–139) допускаемых санитарно-гигиеническим регламентом СанПин 2.3.21078-01.

Радиоэкологические исследования последних десятилетий на Севере ориентированы на задачи прикладного характера. В них значительное внимание уделяется вопросам обеспечения радиационной безопасности объектов с радиоактивными отходами (РАО), захороненных на дне Карского моря и заливов архипелага Новая Земля (Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. О загрязнении арктических морей радиоактивными отходами западноевропейских радиотехнических заводов //

Атомная энергия. 1984. Т. 57. Вып. 3. С. 186–188; AMAP Assessment 2009: Radioactivity in the Arctic. Oslo, 2010).

Мониторинг этих районов проводился в рамках международных научно-исследовательских рейсов (1991–1994) на судах России (AMAP Assessment 2009: Radioactivity in the Arctic. Oslo, 2010). Были получены объективные данные по современному состоянию загрязнения ИРН вод северных морей России, позволившие оценить роль отдельных источников ИРН. Итогом этих исследований стало признание ведущей роли глобальных выпадений ИРН из атмосферы в радиоактивном загрязнении северных морей России и приноса течением в северные моря отходов атомной промышленности западноевропейских стран (AMAP Assessment 2009: Radioactivity in the Arctic. Oslo, 2010). Исследования, выполненные в Карском море вблизи захороненных объектов, содержащих РАО (Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). М.: ИздАт, 2005; AMAP Assessment 2009: Radioactivity in the Arctic. Oslo, 2010), показали, что особой опасности эти объекты для морской среды еще не представляют. Некоторые из захороненных объектов были рассчитаны на устойчивость к утечке во внешнюю среду на срок ≈ 500 лет (Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). М.: ИздАт, 2005).

Для радионуклидов ^{90}Sr (стронций), ^{137}Cs (цезий) с полупериодом распада $T = 30$ лет такого времени до-