

Рис. 3. Результаты палеоклиматических реконструкций по данным фирновых кернов в районе станции Восток (Ekaykin A.A., Veres A.N., Wang Y. Recent increase in the surface mass balance in central East Antarctica is unprecedented for the last 2000 years // Nat. Communications Earth & Environment. 2024. Vol. 5. № 200. P. 1–8): а — реконструкция скорости снегонакопления (SMB) (синяя линия), сиреневой линией показан ход SMB по данным снежных шурфов, а темно-синей линией — линейный тренд SMB по данным снегомерного полигона ст. Восток; б — приземная температура воздуха на станции Восток по результатам реконструкции (оранжевая линия) и по метеорологическим данным станции Восток (черная линия); в — температура в источнике влаги по данным реконструкции (зеленая линия) и температура поверхности океана в Южном полушарии по данным NOAA

Оказалось, что до 1800 года средняя скорость снегонакопления составляла около 18 мм водного эквивалента (в. э.) в год, что на четверть ниже современных (1970–2021) значения, равного 22,5 мм в. э. Выполненные нами статистические расчеты показали, что с вероятностью 94,3 % современная скорость снегонакопления является беспрецедентной за последние 2000 лет. Рост скорости накопления снега связан с ростом температуры: до 1800 года средняя годовая приземная температура воздуха в районе станции Восток была примерно на 0,5–1,0 °C ниже современной. Полученные данные позволили рассчитать такой важный параметр, как чувствительность скорости снегонакопления к температуре, которая составила $11 \pm 2 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ (т. е. при повышении температуры на 1 °C скорость снегонакопления увеличивается на 11 %). Эта величина находится на верхнем пределе разброса значений чувствительности, которые можно найти в литературных источниках (от 2 до 10 %/°C).

Таким образом, полученные нами исследования позволили сделать несколько важных выводов:

- впервые было подтверждено значимое влияние современного потепления на баланс массы снежной поверхности в Центральной Антарктиде;
- впервые было показано, что современные изменения гляцио-климатических параметров в Центральной Антарктиде вышли за рамки естественной изменчивости, характерной для доиндустриального периода;
- наконец, была надежно определена чувствительность скорости снегонакопления в Центральной Антарктиде к изменению температуры воздуха, которая оказалась выше предыдущих оценок.

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения прогноза будущего вклада Антарктиды в изменение уровня моря. В частности, относительно высокая чувствительность баланса массы снежной поверхности к температуре означает менее интенсивную потерю массы Антарктическим ледниковым щитом в ходе будущего потепления. Впрочем, сценарий, при котором прирост массы в центре материка превысит расход массы на его краях, следует считать маловероятным.

А.А. Екайкин, А.Н. Верес (ААНИИ)

ОЦЕНКИ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИЙ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ И ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ НА СТАЦИОНАРАХ ААНИИ, БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ В МОРЯХ КАРСКОМ И ЛАПТЕВЫХ

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ), направленного на создание Единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ, и Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы (ФНТП) принимает участие в работе консорциума № 2 «Климатический и экологический мониторинг ключевых районов Мирового океана и морей России». Основной целью работы консорциума является создание системы мониторинга Северной Атлантики и морей России для оценки их роли в формировании климатических и экосистемных изменений Мирового океана, а также влияния долгопе-

риодных изменений морской среды на глобальный баланс парниковых газов.

Головной организацией консорциума выступает Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, а ААНИИ, наряду с еще пятью ведущими морскими научно-исследовательскими учреждениями России, выступает как соисполнитель работ в части российских арктических морей.

Основная задача ААНИИ на трехлетний период реализации проекта с 2022 по 2024 год — оценка межгодовой изменчивости концентраций климатически активных газов и потоков энергии на стационарах ААНИИ, а также биогеохимических циклов в морях Карском и Лаптевых.

В ходе выполнения проекта в 2023 году была подготовлена компоновка системы мониторинга параметров

углеродного цикла и потоков парниковых газов и энергии на стационарах ААНИИ по четырем направлениям: энергомассобмен, углеродный цикл и потоки парниковых газов, карбонатная система и биогенные элементы, содержание хлорофилла и первичной продукции.

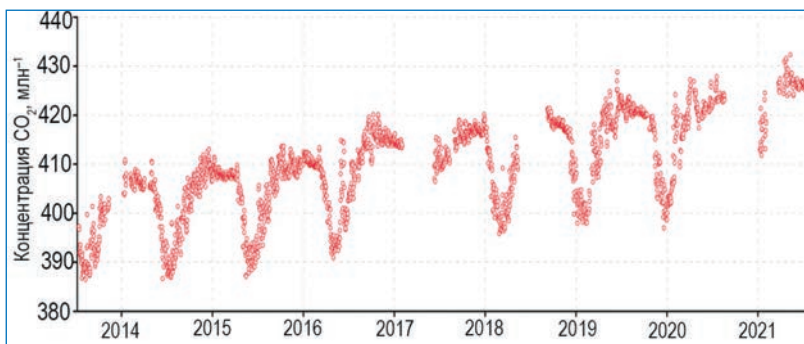


Рис. 1. Межгодовая изменчивость концентрации углекислого газа в 2014–2022 годах на ГМО Тикси

Впервые за последние десять лет, прошедших с момента окончания работы научных станций на дрейфующем льду, благодаря постройке и вводу в строй в 2022 году научно-экспедиционного судна «Северный полюс», была получена высококачественная информация о характеристиках свободной атмосферы в центральной части Арктического бассейна Северного Ледовитого океана (СЛО), позволившая с использованием разработанного в ААНИИ алгоритма исследовать пространственно-временную изменчивость основных термодинамических характеристик полярной атмосферы в период происходящего в настоящее время потепления Арктики.

Анализ межгодовой изменчивости характеристик свободной атмосферы по данным аэрологических наблюдений показал потепление в приземном слое и нижней тропосфере до уровня 500 гПа с начала 2000-х годов до настоящего времени, в то время как в верхней тропосфере и стратосфере наблюдалось преобладание отрицательных аномалий температуры.

Оценки сезонной и межгодовой изменчивости концентраций парниковых газов показывают, что среднегодовые значения метана и углекислого газа на полярных станциях демонстрируют рост, превышая среднеглобальные значения. Для обоих газов характерен типичный сезонный ход с повышением концентраций в зимние месяцы и монотонным понижением концентраций в летний период (рис. 1). Минимальная концентрация углекислого газа на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» наблюдалась примерно на 10–14 дней позже освобождения ото льда пролива Шокальского. Было показано, что в холодное время года накоплению газов в приземном слое способствует также частое наличие инверсий температуры воздуха.

Результаты анализа почвенных потоков диоксида углерода демонстрируют наличие суточного хода, особенно отчетливо выраженного на участке с растительным покровом, отсутствие отрицательных значений потока углекислого газа на глинисто-ка-

менистом участке, преобладание отрицательного потока на участке с растительностью.

В ходе работ была оценена возможность использования отечественных поверхностных дрейфующих буев для исследования состояния поверхностного слоя рос-

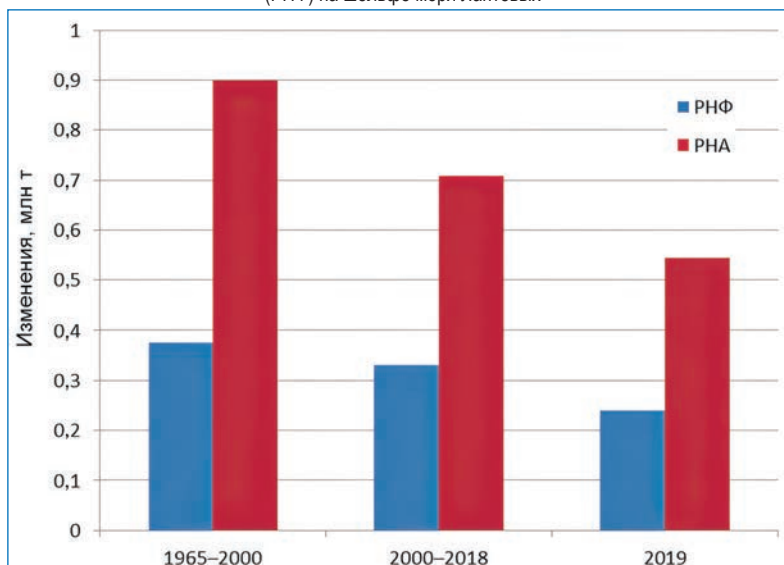
сийских арктических морей. Основным преимуществом дрейфующих поверхностных буев является их возможность в автономном режиме практически непрерывно на протяжении всего года получать и передавать по спутниковым каналам связи информацию о состоянии окружающей среды. Данный инструмент может существенно улучшить наши представления о процессах, происходящих в зимний период, когда все российские арктические моря, за исключением западной части Баренцева моря, покрыты непроходимым для научно-исследовательских судов льдом.

Для дальнейшей работы в следующем году были подготовлены ряды данных спутниковых наблюдений, позволяющих анализировать изменения температуры, солености, а также концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое моря для исследования распространения фитопланктона даже в самых удаленных частях арктических морей. Оценки пространственного распределения и концентраций хлорофилла «а» в арктических морях по спутниковым данным выявили хорошую сходимость с натурными данными в условиях малой облачности.

Анализ результатов определений общей щелочности и рН в морях Карском и Лаптевых позволил получить оценки основных параметров карбонатной системы и запасов растворенного неорганического углерода на шельфе и склоне. Полученные данные позволяют охарактеризовать морскую систему как устойчивую и обладающую достаточной буферной емкостью. Расчеты показывают, что среднегодовой поток CO₂ для акваторий морей Карского и Лаптевых направлен из атмосферы в море.

По данным экспедиций, выполненных в период 2013–2022 годов в морях Карском и Лаптевых, и архивным данным были получены оценки объема и динамики запасов минеральных форм биогенных элементов (азот, фосфор) на шельфе морей, показывающие, что общие запасы биогенных элементов на шельфе моря Лаптевых сравнительно невелики, а за

Рис. 2. Оценка изменений запасов растворенного неорганического азота (РНА) и фосфора (РНФ) на шельфе моря Лаптевых



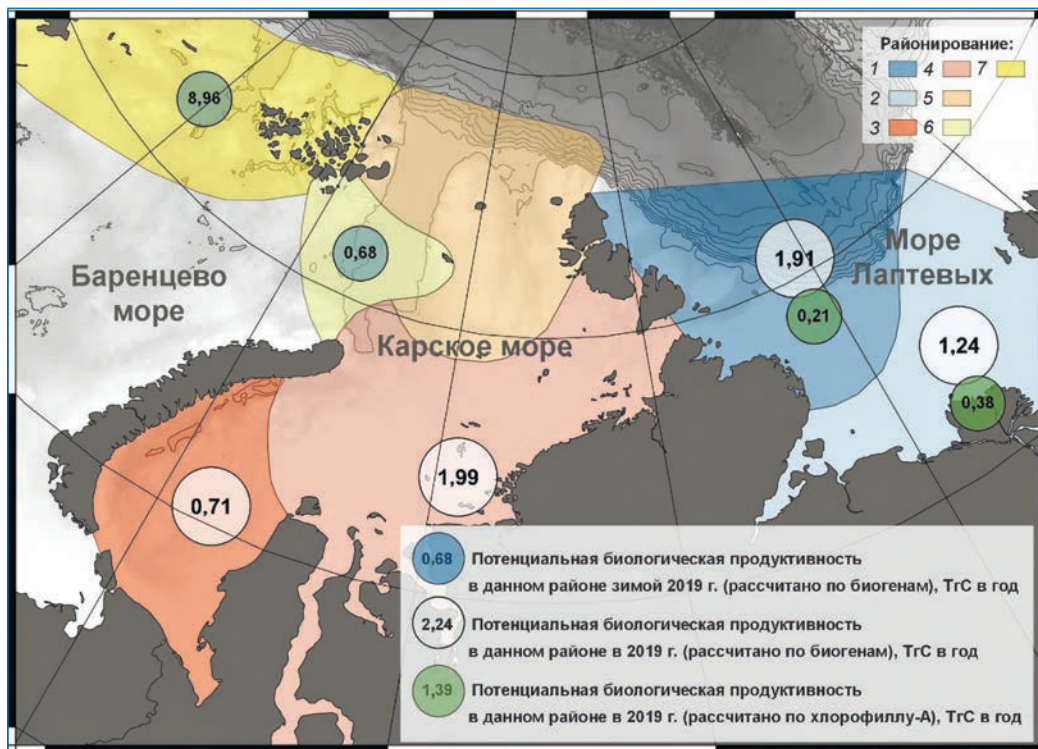


Рис. 3. Оценки потенциальной биологической продуктивности (Тг углерода/год) в 2019 году.

1 — район максимального воздействия арктических и глубинных атлантических вод; 2 — воды материкового стока моря Лаптевых; 3 — поверхностные арктические воды Карского моря; 4 — воды материкового стока Карского моря; 5 — район интенсивного влияния атлантических вод; 6 — центральный район, занятый поверхностными арктическими водами; 7 — шпицбергенский тип водных масс

последние два десятилетия отмечается их некоторое сокращение (рис. 2). Вероятно, это вызвано увеличившимся потреблением азота и фосфора фитопланктоном за счет увеличения периода цветения вследствие сокращения площади ледяного покрова в летний период. Данные о сокращении запасов азота и фосфора на акватории моря Лаптевых согласуются с оценками роста первичной продукции региона.

Оценки первичной продукции органического вещества в морях Российской Арктики на основе спутниковых данных и данных прямых измерений показали, что в целом продуктивность арктических морей за период исследований увеличивается, что связано с увеличением длительности вегетационного периода в результате наблюдающихся климатических изменений, что выражается в более раннем освобождении морей ото льда и увеличении температуры воды, а также с дополнительным притоком с атлантическими водами на шельф морей минеральных биогенных элементов, являющихся питательной базой для фитопланктона. Наиболее продуктивными регионами для морей Карского и Лаптевых являются районы влияния речного стока и северные акватории, где происходит взаимодействие вод шельфа и центрального района Арктического бассейна СЛО (рис. 3). При этом продуктивность северных регионов несколько выше. Увеличение потока тепла с атлантическими водами и сокращение площади морского льда, вероятно, окажут влияние на продуктивные процессы в центральной части СЛО.

Одним из перспективных источников информации являются данные, полученные с помощью математического моделирования процессов, происходящих в Северном Ледовитом океане и его морях. Так, для мониторинга гидрофизического режима на основе математического моделирования была использована адаптированная

к условиям Арктического региона конфигурация модели NEMO в морях Баренцевом, Карском, Восточно-Сибирском и Лаптевых, позволяющая воспроизводить мезомасштабные и субмезомасштабные процессы. В результате проведения численных экспериментов за 10-летний период были реконструированы поля океанографических характеристик и характеристик ледяного покрова с высоким пространственным разрешением, что обеспечивает более целостную картину климатических изменений, протекающих в водной толще СЛО.

Полученные в ходе работ над проектом результаты позволят оценить термическое состояние российских арктических морей, получить оценки состояния полярной атмосферы и морских экосистем, улучшить систему мониторинга, а также прогнозирования наблюдаемых параметров в условиях глобальных климатических изменений путем верификации глобальных и региональных математических моделей Мирового океана.

Работы выполнены в рамках Соглашения № 169-15-2023-002 в ходе реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Помимо авторов в подготовке материалов по проекту принимали участие следующие сотрудники института: А.П. Макштас, П.В. Богородский, А.Е. Новихин, Н.К. Алексеева, А.Д. Тарасенко, И.А. Махотина, М.А. Лоскутова, Е.В. Блошкина, А.Д. Ревина, Я.А. Швед, И.И. Большакова, О.Л. Жукова.

М.С. Махотин, О.Р. Сидорова, В.В. Поважный, В.М. Смоляницкий, А.В. Даньшина, Т.Н. Еременко (АНИИ)