

КОМПЛЕКСНЫЕ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ, КЛИМАТИЧЕСКИЕ, ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АНТАРКТИКИ И ЮЖНОГО ОКЕАНА

Работы по проекту «Комплексные океанологические, климатические, гляциологические и геофизические исследования Антарктики и Южного океана» Плана научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета проводятся с целью мониторинга и установления причин изменений режимно-климатических характеристик Антарктики и Южного океана в наше время и за последние 2000 лет, получения новых данных о гидрологическом режиме крупнейшего на планете подледникового озера Восток, изучения влияния различных солнечных факторов на атмосферу Земли, разработки методов диагностики и текущего прогнозирования состояния магнитосферы и полярной ионосферы и долгосрочного прогноза межгодовых флуктуаций мощности «озоновой дыры», а также с целью изучения процессов энергомассообмена между различными типами подстилающей поверхности и атмосферой в Антарктике.

В настоящей статье представлены основные результаты исследований, выполненных по программе проекта в 2022 году.

Исследование режимно-климатических характеристик Антарктики и Южного океана

Сформирована и интегрирована в СРБД ЕСИМО база судовых океанологических и гидрохимических данных, полученных в период сезонных работ 67-й РАЭ (2022) в районах станций Русская, Мирный и Беллинсгаузен. База данных пополнена прошедшими контролем качества результатами наблюдений последних лет с российских и зарубежных судов, данными буев АРГО и дан-

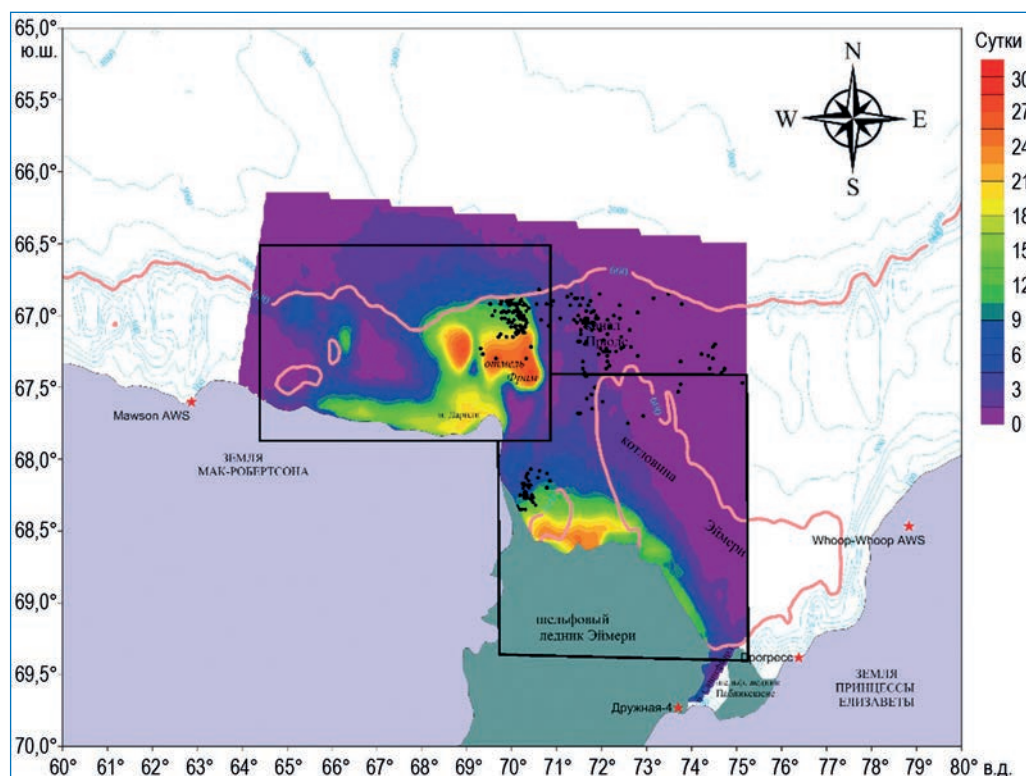
ными, полученными с помощью датчиков, установленных на морских млекопитающих (проект МЕОР).

Выполнен анализ формирования и динамики плотных вод в полынье. Показано, что в результате процессов ледообразования в слое вынужденной конвекции полыньи с открытой водной поверхностью и намерзания молодого льда происходит формирование плотных шельфовых вод. По данным космических наблюдений микроволнового радиометра AMSR-2 получены оценки площадей и времени существования полыней залива Прюдс в зимний период (рис. 1). Анализ характерных метеоусловий над районом существования полыней проводился с использованием ежемесячных данных атмосферного реанализа и данных автоматических метеостанций, в том числе за весь холодный период 2015 года.

Для воспроизведения перемешивания плотных вод в области антарктического шельфа-склона с окружающими водами в процессе каскадинга в зимний период в районе вскрытия полыньи использовался специально настроенный программный комплекс Fluidity-ICOM. На основе 3D численного эксперимента в локальной области полыньи получены численные оценки и выполнен предварительный анализ конвективной динамики вод под полыней.

Подготовлено режимно-справочное пособие для района российской антарктической станции Молодежная, включающее описание физико-географических условий региона и истории его исследований, истории создания и развития станции, океанологического, метеорологического и ледового режимов района располо-

Рис. 1. Повторяемость существования полыней (областей открытой воды) в заливе Прюдс в июне (в сутках) за 2009–2021 годы по данным микроволнового спектрорадиометра AMSR-2. Точками показаны места всплытия морских млекопитающих в июне за весь период реализации программы МЕОР



жения станции. Представлены результаты выполненных на станции Мирный метеорологических и прибрежных ледовых наблюдений за весь период ее существования.

Как и в двух предыдущих пособиях по районам станций Прогресс и Мирный, впервые представлена информация о внутригодовой изменчивости режима вод моря Космонавтов не только по базе данных судовых наблюдений, но и с использованием данных гидрологических наблюдений, полученных с помощью датчиков, установленных на морских млекопитающих, а также на дрейфующих буях ARGO. Это позволило проследить особенности структуры вод и характеристик водных масс для каждого месяца и сезона года.

Другой особенностью пособия является представление в нем отдельным разделом материалов наблюдений на крупномасштабных океанологических съемках. Море Космонавтов единственное в Южном океане, где были выполнены такие съемки. Материалы съемок (а их было три) показывают наличие в море условий для поступления тепла в поверхностный слой, что приводит к регулярному появлению здесь полыней глубокого океана. Две съемки были выполнены с разницей во времени около 2 месяцев, что дает возможность проследить реальную изменчивость структуры, развитие процессов вертикального обмена и сильное потепление верхнего слоя воды.

Гляциологические и изотопные исследования антарктического ледника в районе подледникового озера Восток и Ледораздела В

Получены новые экспериментальные данные о коэффициенте теплопроводности снега в условиях его естественного залегания в районе станции Восток. Анализ сезонных вариаций температуры снега на различных горизонтах снежной толщи в интервале глубин 0–10 м позволил установить зависимость теплопроводности снега от его пористости для этого района Центральной Антарктиды. С использованием полученной зависимости по данным мониторинга температуры верхнего 100-метрового слоя ледниковой толщи реконструирован межгодовой ход эффективной температуры поверхности ледника на станции Восток в период с 1940 по 2016 год (рис. 2). Было установлено, что средняя скорость роста температуры поверхности ледника в районе станции Восток в период с 1958 по 2016 год составляла примерно

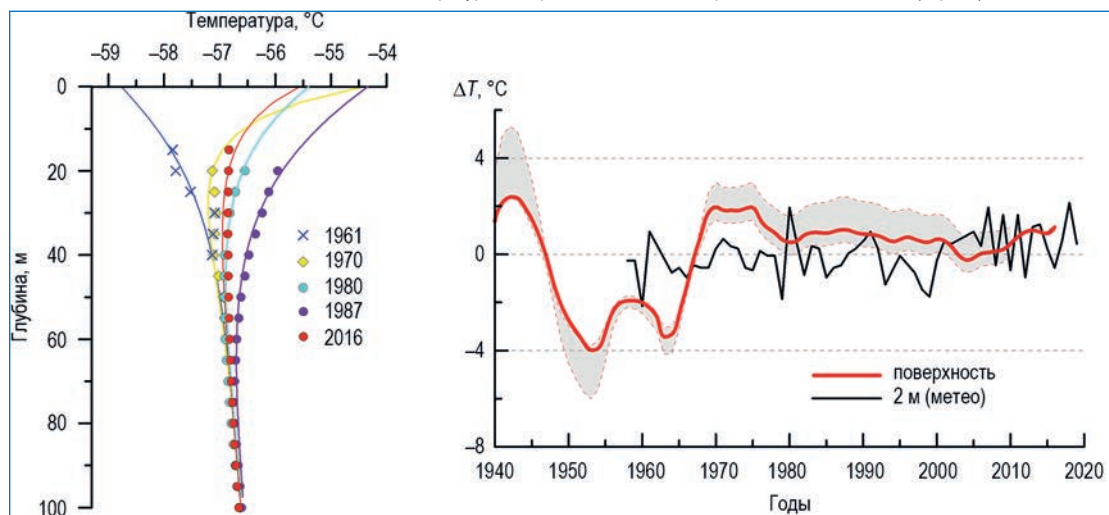
0,03 °C/год, т. е. примерно в два раза превышала среднюю скорость роста среднегодовой температуры воздуха по данным метеонаблюдений. Исследование показало, что и эффективная температура поверхности ледника, реконструированная по данным скважинной термометрии, и изотопный состав отложенного снега в районе станции Восток значительно лучше коррелируют с летней температурой воздуха, чем со среднегодовой, что позволяет использовать их для реконструкции температуры летних сезонов года в прошлом.

По кернам глубоких скважин 5Г-1 и 5Г-3, пробуренных на станции Восток, проведены исследования изотопного состава (δD , $\delta^{18}O$ и $\delta^{17}O$) конгеляционного льда, наросшего на основание ледника из воды подледникового озера Восток. Анализ сводного изотопного профиля 230-метровой толщи озерного льда, построенного с разрешением 10 см, позволил выделить в ее пределах слои, формирование которых происходило в разных условиях льдообразования, характерных для разных участков линии тока ледника, проходящей через станцию Восток. В частности, было установлено, что изменения концентрации тяжелых изотопов во льду глубже 3608 м отражают пространственно-временные изменения изотопного состава озерной воды, связанные с меняющимся притоком талой ледниковой воды в район льдообразования из северных частей озера.

Развитие методов мониторинга и наукастинга состояния магнитосферы и полярной ионосферы и методов прогнозирования межгодовых изменений «озоновой дыры»

В целях разработки научных и прикладных методов мониторинга состояния магнитосферы и полярной ионосферы было продолжено изучение возможностей использования PC -индекса магнитной активности как показателя поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра. По данным за 23 и 24 циклы солнечной активности (1997–2019 годы) показано, что соотношения, определяющие связь между геоэффективностью солнечного ветра (электрическое поле E_{KL}), магнитной активностью в полярных шапках (PC -индекс) и магнитосферными возмущениями (магнитные бури и суббури), остаются неизменными в разных циклах солнечной активности и, следовательно, имеют универсальный характер. Исследована природа сезонных вариаций в соотношениях между PC -индексом, полем E_{KL} и индексами

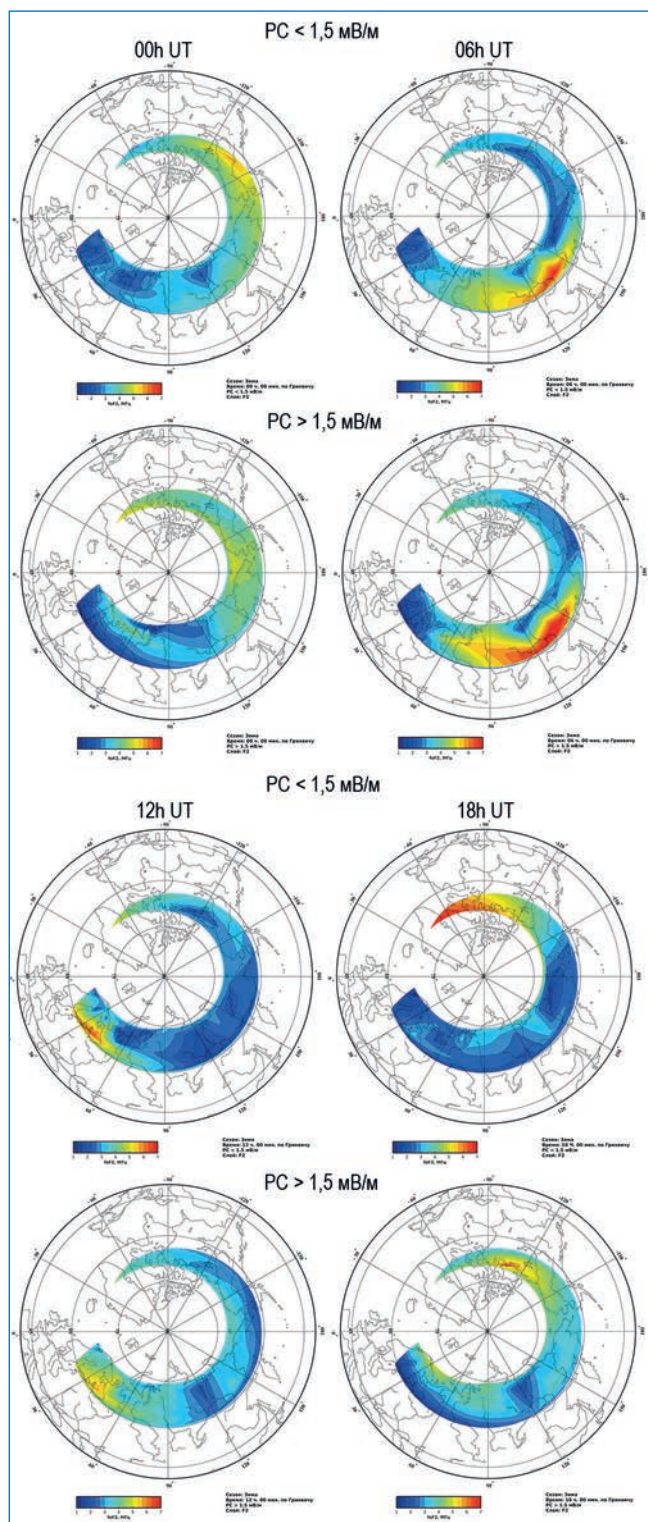
Рис. 2. Расчетные и измеренные профили температуры снежно-фирновой толщи в районе ст. Восток (слева) и восстановленные аномалии температуры поверхности ледника в период с 1940 по 2016 год (справа)



магнитных возмущений AL и Dst и сделан вывод о большей информативности PC -индекса в зимней полярной шапке (PC_{WINTER}).

Показана возможность стандартизации изменений критических частот f_0F_2 слоя в авроральной ионосфере с использованием PC -индекса в качестве калибровочного индикатора, что обеспечивает возможность мониторинга f_0F_2 слоя в авроральной ионосфере по оперативным данным о PC -индексе (рис. 3).

Рис. 3. Стандартизация вариаций критических частот f_0F_2 слоя в авроральной ионосфере с использованием PC -индекса в качестве калибровочного индикатора



Исследована зависимость межгодовых вариаций депрессии общего содержания озона (ОСО) в Антарктике («озоновой дыры») от вариаций УФ-излучения Солнца на средних (2–3 года) и длинных (~11 лет) периодах. Показано, что межгодовые изменения интенсивности «озоновой дыры» определяются особенностями квазидвухлетней осцилляции (КДО) зональных ветров в тропической зоне и сезонными закономерностями циркуляции между экваториальной и полярными областями атмосферы Земли (циркуляция Брюера–Добсона), что обуславливает строго ограниченное число возможных вариантов соотношения фаз цикла КДО с сезонами года и объясняет закономерности влияния крупномасштабной циркуляции на межгодовые флуктуации интенсивности «озоновой дыры» в Антарктике. На основании полученных результатов сделан прогноз мощности «озоновой дыры» в Антарктике на 2023 и 2024 годы, в соответствии с которым в оба эти года в высоких широтах Южного полушария ожидаются положительные аномалии ОСО и, следовательно, относительно слабые по мощности «озоновой дыры».

По данным наблюдений на станции Новолазаревская в период минимума 24–25 цикла солнечной активности (2021–2022 годы) подтвержден сделанный ранее вывод о том, что изменения солнечного ультрафиолетового излучения в диапазонах 280–315 нм и 315–400 нм связаны с циклическими вариациями магнитного поля Солнца.

Исследование процессов энергообмена между различными типами подстилающей поверхности и атмосферой в Антарктиде

В районе российской антарктической станции Беллинсгаузен в период сезонных работ 67-й РАЭ были выполнены синхронные измерения приходящей и отраженной солнечной радиации в диапазоне 400–700 нм (фотосинтетическая активная радиация — ФАР). Исследовались участки снежно-ледниковых покровов с помощью БПЛА Геоскан-401 (ООО «ГЕОСКАН», СПб). Синхронно с полетами БПЛА на поверхности ледника проводились измерения приходящей солнечной радиации в аналогичном диапазоне длин волн. На БПЛА был установлен специальный измерительный блок конструкции ААНИИ, включающий фотометр LQ-190SA (LICER, США), фотокамеру и инфракрасный термометр. Аналогичный фотометр входил в состав наземного блока, что позволило рассчитать величину альбедо, а также оценить альбедо с помощью специально разработанной методики, использующей яркостные характеристики подстилающей поверхности.

Объектом исследований был ледник Коллинз, являющийся частью ледникового купола Беллинсгаузен, расположенного в южной части острова Кинг-Джордж. Результаты определения альбедо с помощью БПЛА и наземного комплекса (рис. 4а) продемонстрировали перспективность использования БПЛА для получения оперативных оценок альбедо труднодоступных участков поверхности ледника. Именно здесь было зафиксировано резкое изменение значений альбедо от 80–85 % в районе купола до 30–35 % в зоне краевых трещин.

Здесь же наблюдается и наиболее интенсивное таяние на поверхности ледника, о чем свидетельствуют результаты термосъемки (рис. 4б). Повышение температуры поверхности суши к западу от кромки ледникового купола может быть связано с распространением талых вод в виде поверхностного ледникового стока.

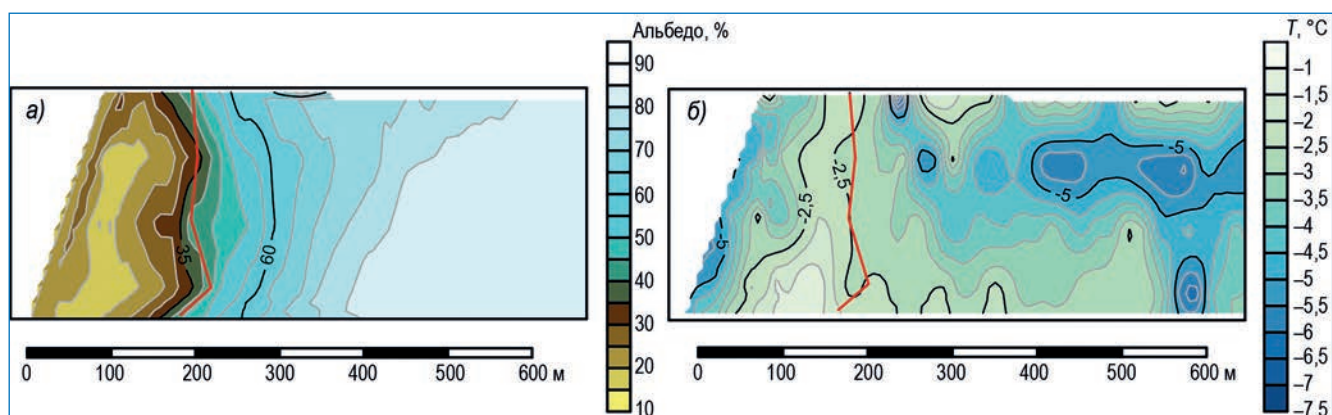


Рис. 4. Альbedo (а) и температура поверхности (б) ледника Коллинз. Красная линия — западная граница ледникового купола

На основе данных ежегодных Российских антарктических экспедиций и результатов исследований, выполненных в рамках настоящего проекта и предшествовавших ему аналогичных проектов, подготовлен обзор состояния климата Антарктики. Он включает данные мониторинга природной среды Антарктики за последние

десятилетия, результаты многолетних наблюдений за скоростью аккумуляции снега на станции Восток, а также результаты реконструкции климатических изменений за последние 2000 лет по данным кернов мелких скважин.

В.Я. Липенков, Н.Н. Антипов, О.А. Трошичев, Б.В. Иванов, А.В. Клепиков (ААНИИ)

ПОИСК АРКТИЧЕСКИХ БОБОВЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ БАКТЕРИАЛЬНЫХ СИМБИОНТОВ В ДЕЛЬТЕ ЛЕНЫ И НА ПЛАТО ПУТОРАНА

Глобальное изменение климата, сопровождающееся повсеместным увеличением температуры, сильнее всего проявляется в полярных регионах Земли. В Арктике эти процессы сопровождаются постепенным увеличением глубины протаивания многолетнемерзлых пород и продолжительности периода вегетации, что ведет к существенной перестройке всей арктической экосистемы. Наблюдаемый эффект «позеленения» тундры сопровождается активным продвижением бореальных растительных сообществ на Север, вытеснением аборигенной флоры и заполнением новых экологических ниш. На таких территориях могут формироваться пастбищные фитоценозы, существенную часть которых составляют бобовые растения, вступающие в симбиотические взаимоотношения с азотфиксирующими клубеньковыми бактериями (ризобиями). Такая взаимовыгодная стратегия позволяет бобовым растениям осваивать новые территории благодаря широкой экологической пластичности и устойчивости к стрессовым факторам окружающей среды, одним из которых является низкое содержание азота в почве. Бобовые растения являются основным источником белка как для травоядных сельскохозяйственных животных, так и для диких северных оленей и овцебыков.

Изучение биоразнообразия клубеньковых бактерий, образующих азотфиксирующие клубеньки на корнях арктических пастбищных и дикорастущих бобовых растений, позволит дополнить спектр видов этих бактерий и создать уникальную коллекцию ризобий как ценного генетического ресурса для использования в сельском хозяйстве в экстремальных условиях Арктики. Изучение симбиотических взаимодействий арктических бобовых и клубеньковых бактерий позволит получить уникальные фундаментальные знания об адаптации растений и микроорганизмов к экстремальным почвенно-климатическим условиям Арктики для их последующего использования в восстановлении нарушенных земель,

а также для оценки сельскохозяйственного потенциала бобово-ризобияльного симбиоза при формировании высокопродуктивных пастбищных фитоценозов в северных регионах России.

С целью поиска и сбора вегетативной части, семян и корневых клубеньков северных дикорастущих бобовых растений были проведены две экспедиции, организованные Всероссийским научно-исследовательским институтом сельскохозяйственной микробиологии (ВНИИСХМ, Санкт-Петербург) совместно с Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ, Санкт-Петербург), в арктические заполярные регионы России.

Первая экспедиция в дельту реки Лены, на остров Самойловский (Республика Якутия (Саха)) состоялась в июле–августе 2021 года. Вторая экспедиция на плато Путорана (Красноярский край) была осуществлена в июле–августе 2022 года. Экспедиции были проведены в срок от начала цветения до созревания семян, чему способствовал короткий период вегетации бобовых в Арктике.

Методы и полевые исследования

Поиск, сбор и видовая идентификация бобовых растений проводились совместно с ботаниками Николаем Николаевичем Лацинским (Центральный Сибирский ботанический сад СО РАН) в дельте реки Лены, а также Игорем Николаевичем и Еленой Борисовной Поспеловыми (Институт проблем экологии и эволюции РАН и ФГБУ «Заповедники Таймыра») на плато Путорана.

Для всех собранных видов растений были собраны корневые клубеньки, пробы ризосферной почвы и семена растений. Клубеньки и семена хранили в чистых бумажных конвертах и сушили при комнатной температуре. Образцы почвы собирали в чистые пластиковые пакеты и хранили при +4 °С. Все образцы почв, семян и клу-