

и на этой основе выделение территориальных образований, для которых будут определяться показатели уязвимости; составление реестра систем (природных и социально-экономических) для каждого территориального образования; оценка чувствительности природных и антропогенных систем к изменению климата; определение пороговых значений индикаторов изменения климата для отдельных систем; формирование для каждой системы ключевых индикаторов изменения климата, что выполняется в основном методом экспертных оценок. Таким образом, оценка уязвимости арктических систем к изменению климата имеет сложный междисциплинарный характер.

Необходимо подчеркнуть, что восприимчивость (уязвимость) систем к негативным воздействиям окружающей среды лежит в основе управления климатическими рисками и формирования государственной

политики в области адаптации к изменению климата. Согласно Шестому оценочному докладу МГЭИК, климатические риски в планетарном масштабе только возрастают. Недавно Всемирная метеорологическая организация подтвердила, что 2024 год стал самым жарким годом за всю историю наблюдений: среднеглобальная температура превысила доиндустриальный уровень на 1,55 °C. Последние десять лет продемонстрировали исключительную череду рекордно высоких температур. По-видимому, изменение климата в сторону потепления сохранится в обозримой перспективе. Это обстоятельство обуславливает актуальность комплекса проблем, связанных с климатическими изменениями, в том числе проблемы оценки уязвимости систем к негативным воздействиям окружающей среды, являющихся следствием изменения глобального климата.

С.А. Солдатенко (ААНИИ)

ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ РЕСУРС МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В АРКТИКЕ

Активные области на Солнце, такие как вспышки, протуберанцы, солнечные пятна, порождают комплекс процессов и явлений в межпланетной среде, околоземном космическом пространстве и верхней атмосфере, который оказывает заметное воздействие на среду обитания человека. Изменение состояния магнитосферы (часть околоземного космического пространства, занятая геомагнитным полем Земли) и ионосферы (область в верхней атмосфере приблизительно 50–1000 км над уровнем моря) под действием повышенной солнечной активности оказывает в высоких широтах существенное влияние на функционирование систем радиосвязи, радиолокации и навигации; ионосферные токи генерируют на поверхности Земли электрические поля, а в энергетических, коммуникационных системах и в трубопроводах — мощные геомагнитно-индуцированные токи, приводящие к нарушениям в работе этих систем. Установлено также влияние гелиогеофизических возмущений на атмосферные процессы и здоровье человека. Информация об условиях геофизической обстановки используется для решения широкого комплекса задач, имеющих оборонное и хозяйственное значение, от обеспечения надежного функционирования космических систем до освоения высоких широт.

Для наблюдения за геофизической обстановкой во многих странах существуют сети мониторинга, включающие в себя наземные и космические инструменты. Одной из ключевых задач мониторинга является обнаружение и прогноз опасных гелиогеофизических явлений, которые характеризуются совокупностью процессов, влияющих на функционирование технических средств и систем и имеющих биомедицинские последствия.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт активно проводил регулярные исследования состояния магнитного поля Земли и ионосферы с 30-х годов XX века. На данный момент система мониторинга состоит из пунктов наблюдений на одиннадцати арктических станциях Росгидромета и ФГБУ «ААНИИ», расположенных вдоль активной области авроральной зоны, более чем в пяти часовых поясах, и четырех стан-

ций в Антарктиде, три из которых расположены в авроральной зоне и одна в зоне полярной шапки. Непрерывный мониторинг геофизической обстановки в высоких широтах включает в себя геомагнитные и риометрические наблюдения, наклонное и вертикальное радиозондирования ионосферы. На основе результатов мониторинга рассчитываются различные индексы геомагнитной активности, позволяющие оперативно оценить геофизическую обстановку в регионе. Сбор, хранение и передача потребителям геофизической информации в режиме реального времени осуществляются в подразделении отдела геофизики — Полярном геофизическом центре (ПГЦ). Для представления результатов геофизических наблюдений и предоставления доступа к разработанным программным продуктам создан цифровой информационный ресурс, доступный на новом сайте ПГЦ по адресу <https://geophys.aari.ru/>.

Структура сайта

Сайт разделен на две части — «Оперативные данные наблюдений» и «Модельные расчеты». В раздел «Оперативные данные наблюдений» входят данные наблюдений и результаты их обработки.

Риометрические измерения представлены в виде суточных графиков (рис. 1), обновляемых в реальное время, с арктических (пос. Баренцбург, м. Баранова и п. Тикси) и антарктических (ст. Прогресс и ст. Новолазаревская) пунктов наблюдения. Риометры измеряют радиоизлучение из космоса (космический радиошум) на частоте 30 или 32 МГц и позволяют оценить изменения электронной концентрации в D (60–90 км) и нижней части E (90–150 км) слоя авроральной ионосферы. В периоды магнитосферной активности потоки высыпающихся электронов с энергией десятки кэВ ионизируют ионосферную плазму на высотах 90–120 км, что приводит к поглощению космического радиоизлучения. На основе риометрических данных рассчитываются балл поглощения полярной шапки и балл поглощения в авроральной зоне.

Геомагнитные наблюдения на станциях сети проводятся с целью мониторинга и получения оперативной

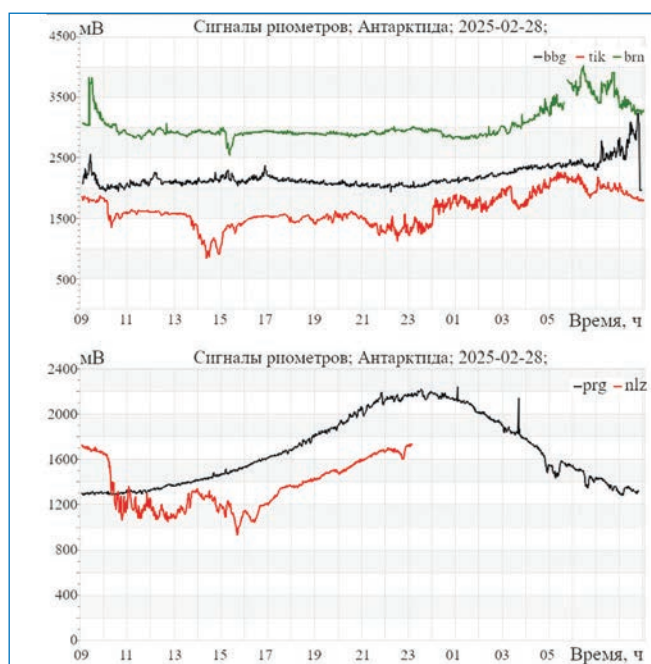


Рис. 1. Графики измерений космического шума на арктических станциях Баренцбург (bbg), Баранова (bn) и Тикси (tik) и антарктических станциях Прогресс (prg) и Новолазаревская (nlz)

информации о состоянии магнитного поля Земли. По данным этих наблюдений рассчитываются различные индексы, характеризующие геофизическую обстановку. Из имеющихся в ПГЦ геомагнитных наблюдений на сайте представлены суточные графики вариаций магнитного поля Земли на антарктических станциях Мирный, Восток, Прогресс и Новолазаревская, суточные графики геомагнитных индексов (PC , AL , AR и Dst) и краткая сводка геофизической обстановки на текущий момент. Обновление графиков и сводки производится в реальном времени. Пример страницы сайта с графиками вариаций магнитного поля Земли на станциях Мирный, Прогресс и краткой сводки в левой части сайта представлен на рис. 2.

Индексы AL (показатель интенсивности магнитосферных суббурь) и Dst (показатель интенсивности магнитных бурь) предоставляются Центром анализа данных по геомагнетизму и космическому магнетизму Киотского университета DACGSM (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) в рамках меморандума о сотрудничестве. PCS -индекс, рассчитанный по данным околополюсной станции Восток, характеризует магнитную активность в южной полярной шапке Земли; PCN -индекс считается на основе магнитных измерений станции Туле в Гренландии

и предоставляется Датским техническим университетом. Средний PC -индекс — усредненное значение PCN и PCS .

Оперативная сводка геофизической обстановки состоит из значений индексов PC (среднее), AL , AR , Dst и K -индексов шести арктических станций сети Росгидромета (Баренцбург, Горьковская, Ловозеро, Известия, Диксон и Тикси), баллов поглощения полярной шапки и балла поглощения в авроральной зоне.

На сайте также представлены результаты вертикального зондирования ионосферы, которые отображаются в виде суточных графиков интенсивности рассеянных сигналов (рис. 3). Ионозонд вертикального зондирования ионосферы представляет собой радиолокационную станцию, позволяющую по отраженному сигналу определить высотное распределение электронной концентрации. Зондирование ионосферы проводится каждые 15 минут, однако обрабатываются и отправляются в различные центры мониторинга только часовые сроки, что связано с высокими трудозатратами операторов. Для визуализации всех результатов зондирования было реализовано представление данных в виде суточных графиков интенсивности частотного (в координатах время — частота — интенсивность) и высотного (в координатах время — высота — интенсивность) профилей ионограмм. Для частотного профиля ионограмма разграничивается на E/Es и F (150–1000 км) области по высоте. Частотный график E-области (рыжая цветовая шкала) наложен на частотный график F-области (сине-зеленая цветовая шкала). Цветовые шкалы едины для всех периодов времени. Подобное отображение результатов вертикального зондирования ионосферы не требует затрат рабочего времени оператора, при этом позволяет оценить суточные вариации критических частот ионосферы и высоты отражения зондирующих сигналов. По графикам высотных профилей хорошо прослеживается суточный ход всех видов отражений в E и F областях ионосферы. По графикам частотных профилей выделяется суточный ход регулярного E-слоя, спорадический Es-слой, обыкновенная и необыкновенная волны F2-слоя, диффузность и интенсивность отраженного сигнала. Функция построения графиков позволяет отображать данные за сутки в период с 2010 года по настоящее время.

На основе данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы были построены карты пространственного распределения критической частоты спорадического слоя Es за двадцать магнитных бурь и двадцать суббурь в 24-м цикле солнечной активности. В период геомагнитных бурь и суббурь развивающийся спорадический Es-слой может быть использован для задач КВ-радиосвязи в то время, когда F-область полностью

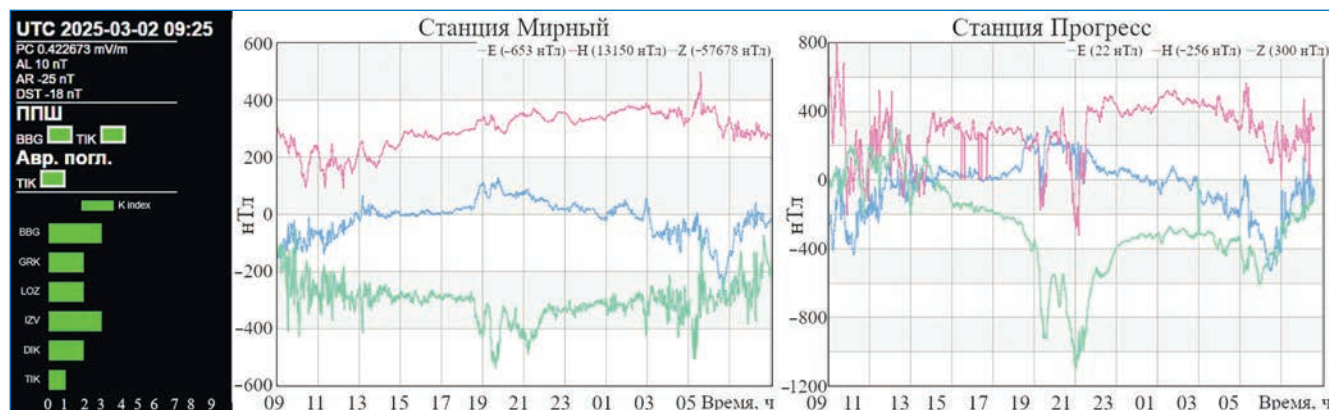


Рис. 2. Страница сайта с графиками вариаций магнитного поля Земли и краткой сводкой геофизической обстановки слева

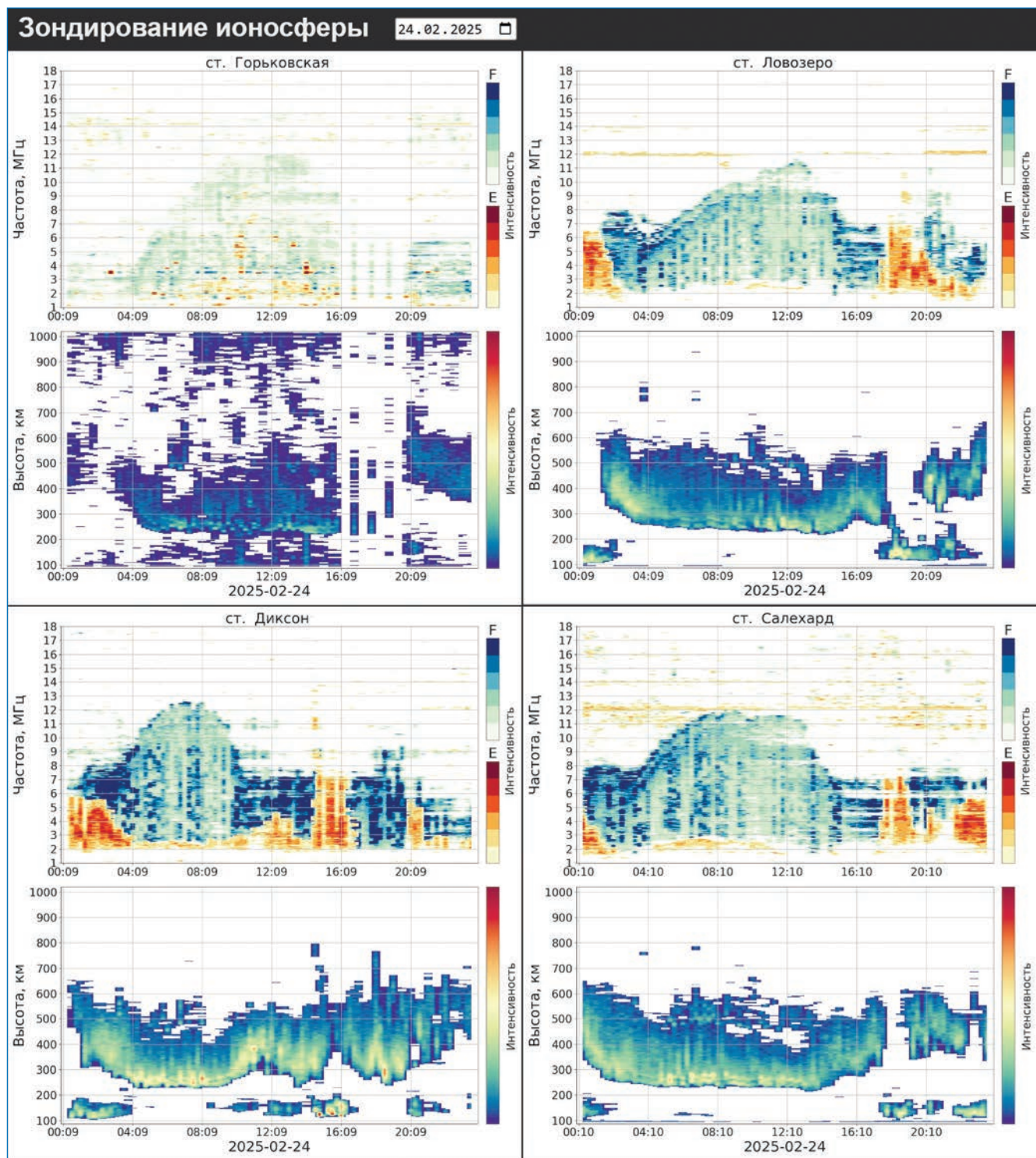


Рис. 3. Графики интенсивности частотного и высотного профилей ионограмм за 24 февраля 2025 года

экранирована. На картах хорошо видна динамика критической частоты, периоды образования и релаксации слоя Es. Карты можно использовать для организации каналов декаметровой радиосвязи, нахождения новых физических закономерностей в системе магнитосфера — ионосфера и для валидации модельных расчетов. Во всем арктическом регионе России количество станций вертикального зондирования и трасс наклонного зондирования ионосферы недостаточно для плотного пространственного покрытия ионосферы, поэтому на данный момент взята только европейская часть Арктики. Для построения карт использовались результаты

обработки ионограмм вертикального зондирования. Результаты наклонного зондирования пересчитываются в критические частоты вертикального зондирования для средней точки трассы — точки отражения сигнала от ионосферы. Пространство между точками измерений заполнено при помощи алгоритмов интерполяции.

В разделе «Модельные расчеты» созданы страницы для доступа к разработанным в отделе геофизики моделям авроральных высыпаний (Ovation Prime PC) и E-области ионосферы в Арктической зоне Российской Федерации (AIM-E), а также главного ионосферного провала, авторства В.У. Хэлкроу и Дж. С. Нисбета.

Для правильной интерпретации результатов наблюдений различными техническими средствами необходимо иметь представление о положении пункта наблюдения относительно основных крупномасштабных ионосферных структур, которыми являются авроральный овал, главный ионосферный провал, линии терминатора, формирующие горизонтальные градиенты электронной плотности и т. д. Также положение данных структур оказывает сильное влияние на распространение радиоволн дециметрового диапазона. Поэтому для организации надежных каналов связи важно знать ориентацию радиотрассы относительно данных ионосферных образований. Так, понижение электронной концентрации N_e в провале существенно ограничивает применимый диапазон частот радиотехнических систем дециметрового диапазона. Крутая полярная стенка провала представляет собой резкий горизонтальный градиент электронной концентрации. Ее влияние проявляется в виде образования нестандартных боковых мод распространения. Зона аврорального овала характеризуется высокими критическими частотами спорадического Es-слоя, что делает невозможной связь через регулярный F-слой и, наоборот, позволяет организовывать линии связи на высоких частотах посредством отражения от Es-области.

На странице главного ионосферного провала отображаются линия терминатора на земной поверхности и заданной пользователем высоте, подсолнечная точка, южная и северная границы главного ионосферного провала, а также дно провала. На странице можно отобразить заданную пользователем траекторию радиотрассы вдоль дуги большого круга.

Следствием активных структурных изменений в возмущенной магнитосфере является формирование и расширение авроральной зоны в сторону экватора, при этом интенсивность авроральных высыпаний частиц значительно увеличивается, становясь основным источником ионизации в полярной ионосфере. Усиливающийся поток энергии электронов и ионов на высоких широтах в ночном секторе сопровождается свечениями (полярными сияниями) на уровне E- и F-слоя ионосферы. Одной из наиболее совершенных моделей авроральных высыпаний частиц в настоящее время является эмпирическая модель OVATION Prime (2010) и ее более поздние модификации, которая была разработана Патриком Ньюэллом и его коллегами в Университете Джона Хопкинса в лаборатории прикладной физики (JHU/APL, Мэриленд, США). В отделе геофизики ФГБУ «ААНИИ» была разработана модифицированная версия модели OVATION Prime PC на основе модели OVATION Prime (2010), в которой входной параметр заменен на наземный индекс полярной шапки (PC-индекс). На странице сайта можно узнать расчетное положение аврорального овала и его интенсивность для текущего момента времени либо рассчитать для заданной даты. Также величины потоков и энергий электронов и ионов, выпадающих в авроральном регионе, доступны в текстовом виде.

Представленная на сайте модель E-области ионосферы позволяет восстановить концентрацию электронов (N_e), а также профиль плазменной частоты (F_{pl}) для авроральной зоны в диапазоне высот 90–140 км. На сайте доступен расчет профилей N_e и F_{pl} в указанных координатах для выбранной даты. Считаются как регулярный E-слой, так и спорадический слой Es, для чего в качестве входного параметра используют результаты расчета модели OVATION Prime PC.

Сценарии работы с сайтом

На сайте представлены результаты наблюдений различных научно-исследовательских приборов, которые можно использовать как для анализа геофизической обстановки в реальном времени, так и последующего научного анализа.

По результатам геофизических наблюдений в реальном времени можно определить уровень геомагнитной активности. В случае спокойной геофизической обстановки интерес может представлять определение положения радиотрассы или пункта наблюдения относительно крупномасштабных ионосферных структур на странице главного ионосферного провала.

В случае слабо или сильно возмущенной геофизической обстановки пользователю открывается больше возможностей. В первую очередь, будет иметь смысл проанализировать графики индексов геомагнитной активности за последние сутки, чтобы определить длительность и фазу возмущения. Помимо этого, можно определить положение аврорального овала. Определенный интерес представляют графики интенсивности частотного и высотного профилей ионограмм вертикального зондирования ионосферы за предыдущие сутки, что позволяет проследить развитие суббури и время ее начала. Для этих же целей можно сравнить реальные измерения с часовыми модельными расчетами профилей плазменных частот и электронной концентрации.

Например, рассмотрим данные наблюдений за 24 февраля 2025 года. Видно, как в вечерние часы с 17 по 19 UT происходит одновременное экранирование F-области ионосферы спорадическим слоем Es на станциях Ловозеро и Салехард (см. рис. 3). На станции Горьковская в это время наблюдается эффект поглощения сигнала. На станции Диксон экранирование происходит на несколько часов раньше, около 15 часов.

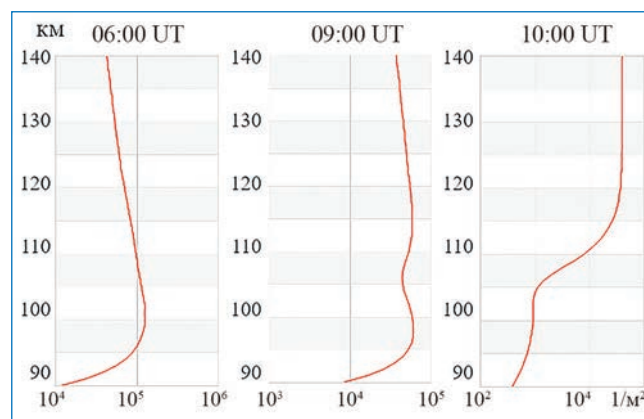


Рис. 4. Графики зависимости электронной концентрации от высоты над уровнем моря на станции Диксон за 6, 8 и 10 UT 24 февраля 2024 года

На примере расчетных профилей электронной концентрации по станции Диксон за тот же период показано формирование спорадического слоя Es. Как видно из рис. 4, в 6 UT существовал регулярный слой E с максимумом электронной концентрации на высоте 100 км, затем начал формироваться спорадический Es в виде дополнительного максимума на высоте 115 км (8 UT), а в 10 UT остался только Es.

Исторические данные

При работе с историческими данными открывается возможность пронаблюдать за динамикой пространственного распределения критических частот

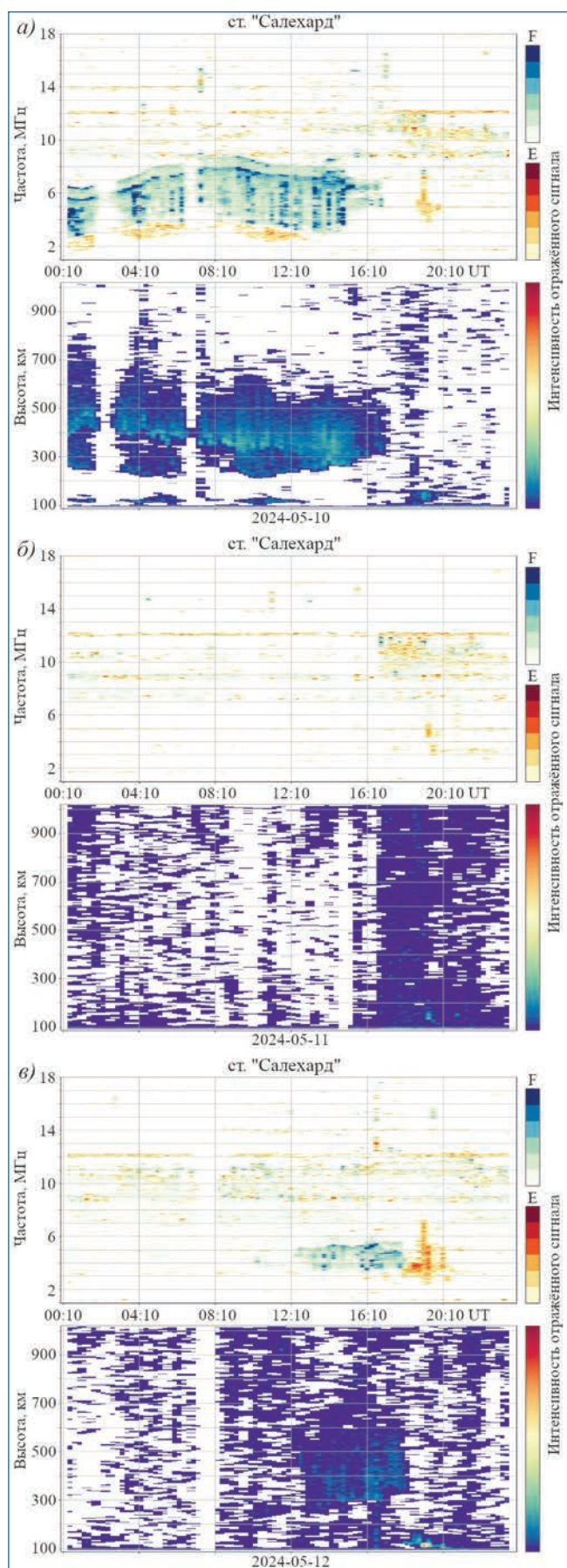


Рис. 5. Графики интенсивности частотного и высотного профилей ионограмм со станции Салехард за 10, 11 и 12 мая 2024 года

Es-слоя. Рассмотрим мощнейшую солнечную бурю, которая произошла 9–12 мая 2024 года и получила в научной литературе название “The Mother’s Day Geomagnetic Storm”.

Эта буря произошла на фоне и так повышенной солнечной активности, поэтому состояние ионосферы было очень интересным. На графиках интенсивностей частотного и высотного профилей ионограмм, приведенных на рис. 5, хорошо видно, как возникало поглощение радиосигнала с 15 UT 10 мая по 13 UT 12 мая. Данные сайта позволяют оценить и поведение Es-области, появляющейся на непродолжительное время вечером 11 мая. Рассмотрим подробнее моменты времени 19:30 и 20:00 UT.

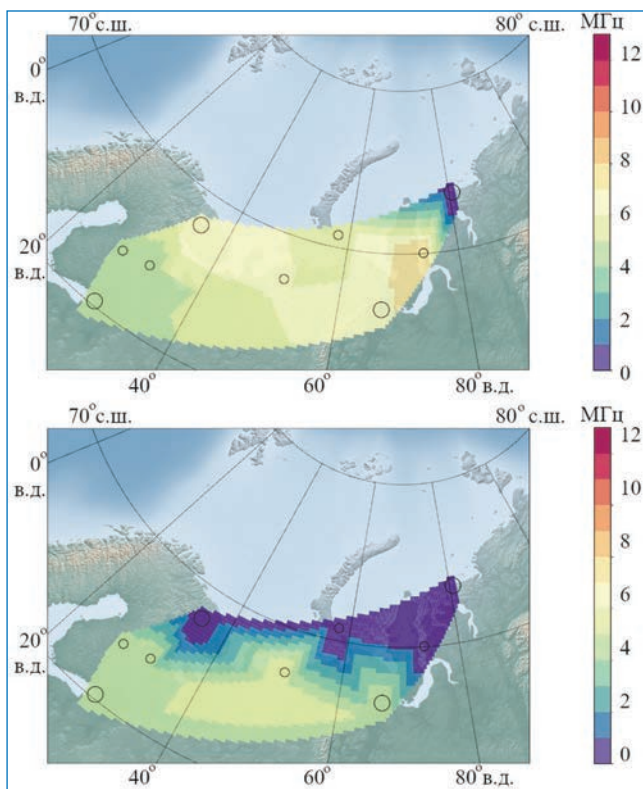


Рис. 6. Карты пространственного распределения критической частоты Es-слоя в 19:30 UT и 20:00 UT 11 мая 2024 года. Большими кружочками обозначены пункты вертикального зондирования ионосферы, маленькими — средние точки отражения сигналов наклонного зондирования ионосферы

На картах пространственного распределения критической частоты Es-слоя видно (рис. 6), как возникла широкая область Es и начала постепенно пропадать. Авроральный овал по данным расчета модели OVATION Prime PC (рис. 7) перекрывал большую часть станций сети, но в 20:00 овал уже не наблюдался. Вновь формирование овала началось около 20:40. Это связано с тем, что PC -индекс в 20:00 был равен нулю, а потом его значение поднялось до возмущенного уровня только через полчаса. Тем не менее по данным вертикального и наклонного зондирования видно, что ионосфера не реагирует так резко на изменения уровня возмущенности, что соответствует теории. По результатам моделирования главного овал ионосферного провала видно, что в исследуемой области установился полярный день и провал в интересующее время не сформировался (рис. 8).

В рамках плана научно-исследовательских и технических работ были разработаны цифровые инфор-

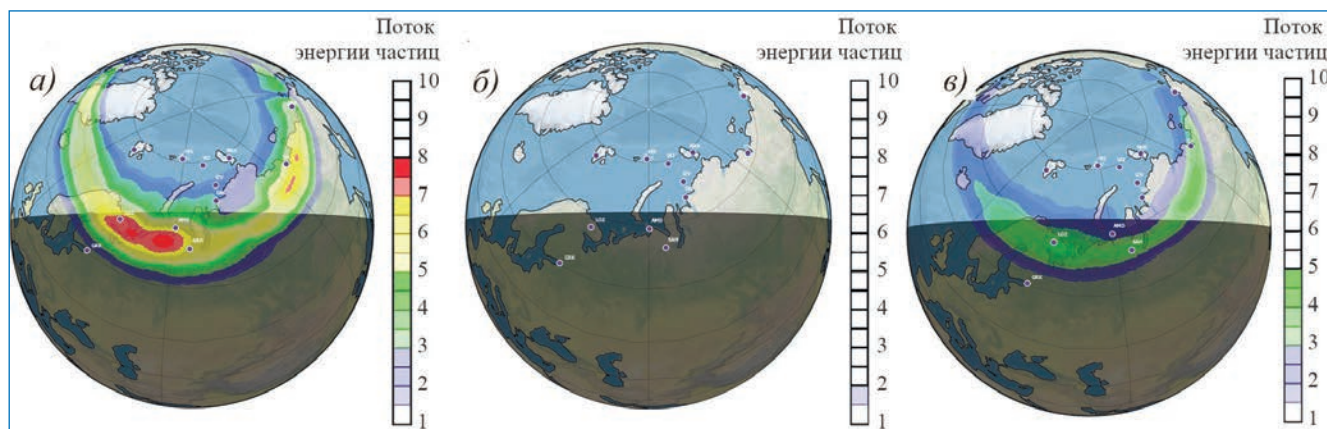


Рис. 7. Положение аврального овала по модели Ovation Prime PC в 19:30 (а), 20:00 (б) и 20:40 (в) UT 11 мая 2024 года. Цветом обозначен поток энергии частиц

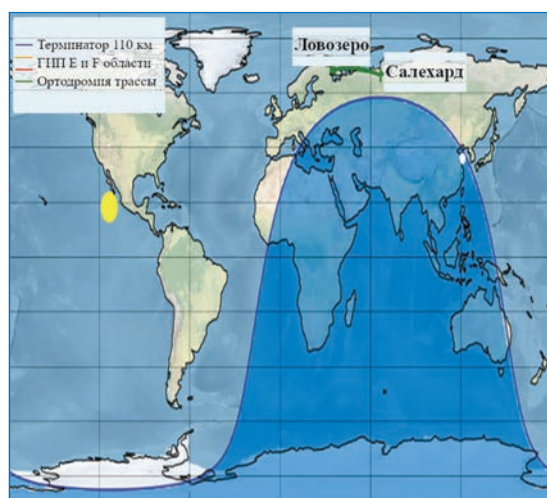


Рис. 8. Положения терминатора на высоте 110 км, главного ионосферного провала и ортодромия трассы наклонного зондирования Ловозеро–Салехард в 19:30 UT 11 мая 2024 года

мационные ресурсы мониторинга и моделирования геофизической обстановки в Арктике. Целью данного продукта является предоставление открытого доступа к результатам мониторинга геофизической обстановки на арктических и антарктических станциях Росгидромета и ФГБУ «АНИИ». Были разработаны серверная структура и пользовательский интерфейс для крупномасштабных ионосферных структур, карт пространственного распределения плазменных частот спорадического Es-слоя, суточных графиков данных вертикального зондирования ионосферы. Открыт доступ к моделям высыпаний частиц Ovation Prime PC и расчета состояния области E авральной ионосферы AIM-E. На сайте представлены страницы с графиками вариаций магнитного поля Земли и поглощения космического шума. Сформирована сводка актуальной геофизической обстановки.

*С.А. Долгачева, Н.А. Степанов,
А.С. Калишин (АНИИ)*

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ МОНИТОРИНГ БАЛАНСА МАССЫ ЛЕДНИКОВ НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН: СВИДЕТЕЛЬСТВА РЕКОРДНОГО ТАЯНИЯ ПОСЛЕДНИХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ

Изучение баланса массы оледенения высокоширотных архипелагов — одно из актуальных направлений современной гляциологии. В последние несколько десятилетий вся Арктика, и в особенности евразийская ее часть, теплеет быстрее, чем планета в среднем. Этот эффект называется арктическим усилением и максимально проявляется в баренцевоморском регионе, где тренд роста приземной температуры воздуха до семи раз превышает глобальный. Поэтому ледяной покров Шпицбергена оказывается более всего уязвимым для современных климатических изменений, в связи с чем одним из направлений работ Арктического и антарктического научно-исследовательского института является мониторинг баланса массы ледников, расположенных на архипелаге.

Объектами мониторинга выбраны два ледника — Альдегонда (площадь 5,2 км²) и Западный Грэнфьорд (площадь 15,9 км²), расположенные вблизи поселка Баренцбург (рис. 1). Наблюдения на этих ледниках поддерживаются наличием круглогодично действующего

Российского центра на архипелаге Шпицберген и экспедициями РАЭ-Ш. Каждый год, с июля по сентябрь, на этих ледниках проводятся гляциологические измерения.

Измерения проводятся гляциологическим методом: в поверхность ледника забуриваются абляционные рейки, по которым измеряется толщина стаявшего слоя льда (рис. 2). Поскольку распределение итоговой величины — баланса массы — зависит от высоты над уровнем моря, рейки расположены так, чтобы наилучшим образом покрывать весь высотный диапазон поверхности ледников (в районе Баренцбурга это примерно от 50 до 600 м над уровнем моря). Сезонные измерения завершаются с окончанием балансового года, в середине сентября, когда температура воздуха становится устойчиво отрицательной.

Анализ полученных рядов баланса массы показал, что наблюдаемые в окрестностях Баренцбурга ледники являются репрезентативными для всего архипелага Шпицберген: межгодовые вариации в балансе массы ледников Альдегонда и Западный Грэнфьорд имеют вы-