

PACS numbers: 94.05.Sd, **94.20.-y**, **94.30.-d**
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005i.0535

Состояние и перспективы геофизических исследований на архипелаге Шпицберген

В.В. Сафаргалеев, Е.Д. Терещенко

1. Шпицберген — геофизический полигон для исследований космической погоды

Географическое положение архипелага Шпицберген предоставляет уникальную возможность для решения ряда геофизических задач, имеющих важное научное и прикладное значение. В первую очередь — это задачи, связанные с проблемой прогнозирования космической погоды.

В дневные часы силовые линии геомагнитного поля связывают ионосферу над Шпицбергенем с участками магнитосферы, через которые энергия и плазма солнечного ветра поступает в околоземное космическое пространство. Накопленная в магнитосферном хвосте энергия высвобождается в ходе суббурь, а постоянный приток энергии из солнечного ветра обеспечивает повторяемость этих наиболее ярких проявлений космической погоды. Попавшая внутрь магнитосферы плазма солнечного ветра смешивается с фоновой плазмой, имеющей существенно иные характеристики, создавая тем самым благоприятные условия для развития плазменных неустойчивостей различного типа. Эти возмущения также являются элементами космической погоды.

Для исследования с поверхности Земли явлений в далёком космосе наиболее подходящим инструментом являются "агенты", переносящие информацию вдоль силовых линий геомагнитного поля, — заряженные частицы и альвеновские волны. Высыпаящиеся в ионосферу электроны порождают полярные сияния. В зимние месяцы ионосфера над Шпицбергенем не освещается Солнцем даже в дневные часы, что даёт уникальную возможность исследовать процессы на магнитопаузе посредством наблюдения дневных полярных сияний. К волнам альвеновского типа относятся, в частности, возмущения, генерируемые в процессе развития ионноциклотронной неустойчивости анизотропной плазмы. Плазменная анизотропия и связанная с ней волновая турбулентность наблюдается спутниками в солнечном ветре в области, непосредственно примыкающей к дневной магнитопаузе. При попадании анизотропной плазмы внутрь магнитосферы, на силовые линии, опирающиеся на ионосферу над Шпицбергенем, эта волновая активность регистрируется индукционными магнитометрами в виде короткопериодных геомагнитных пульсаций (Pc1). Взаимодействие солнечного ветра и вмерзшего в него межпланетного магнитного поля (ММП) с магнитосферой проявляется также в характере крупномасштабной конвекции магнитосферной и ионосферной плазмы. В дневной ионосфере над Шпицбергенем характер конвекции может быть исследован с помощью системы радаров некогерентного рассеяния EISCAT

(European Incoherent Scatter Radar Systems) в Тромсё (краткое обозначение — TRO) (Норвегия) и Лонгьербиене (LYR) (Шпицберген), а также одним из авроральных радаров сети SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) в Ханкасалми (HANK) (Финляндия).

Таким образом, совместные оптические, магнитные и радарные наблюдения на Шпицбергене обеспечивают комплексный подход к изучению такого важного этапа формирования космической погоды, как поступление энергии и плазмы из межпланетной среды (солнечного ветра) в околоземное космическое пространство (магнитосферу). В связи с этим отметим, что, несмотря на интенсивное вовлечение спутниковых измерений в решение задач космической погоды, анализ данных наземных наблюдений остаётся не менее эффективным, особенно с точки зрения баланса между стоимостью и продуктивностью, способом экспериментального изучения процессов на магнитопаузе. Действительно, даже если спутник пересекает магнитопаузу в "нужном" месте и в "нужное" время, что весьма маловероятно, представляющие интерес измерения длятся всего несколько минут. Длительный ряд наземных наблюдений позволяет проследить развитие явления (например, резкую смену знака ММП или скачок давления плазмы солнечного ветра) за больший промежуток времени, охватывающий предысторию этого явления.

Использование ионосферы в качестве своеобразного "экрана", на котором воспроизводятся магнитосферные процессы, стимулирует и исследования самого этого "экрана". Высокая изменчивость ионосферы арктических широт требует непрерывных обсерваторских наблюдений. Регулярные данные об электронном содержании неэффективно получать с помощью дорогостоящих прямых ракетных или спутниковых измерений. Более дешёвыми, но не менее информативными являются методы дистанционного наземного зондирования или спутникового радиопросвечивания. Такие методы позволяют определить электронную плотность в ионосфере с помощью радиоволн, распространяющихся через неё. Зондирование ионозондом — сравнительно дешёвый метод, однако он может использоваться для изучения только нижней части ионосферы. Пространственное разрешение ионозонда невелико. Радары производят измерения с лучшим, чем у ионозонда, пространственным разрешением, но имеют небольшое поле зрения и требуют больших денежных затрат при их регулярном использовании.

Относительно дешёвым способом оценки состояния электронной концентрации ионосферы в пространственной области протяжённостью в несколько тысяч километров вдоль меридиана и высотой порядка 1000 км является метод спутниковой радиотомографии [1]. Дополнительным преимуществом этого метода является то, что он не зависит от погодных и геофизических факторов. Сегодня спутниковая радиотомография является практически единственным доступным способом непрерывной диагностики глобальных образований электронной плотности в ионосфере, в том числе гравитационных волн. Метод также может эффективно применяться для локализации возмущений искусственного происхождения: стартов ракет, промышленных выбросов и ионосферных неоднородностей, возникающих при воздействии на ионосферу мощной радиоволной.

Методы исследования ионосферы, основанные на воздействии на ионосферную плазму пучком мощных

В.В. Сафаргалеев, Е.Д. Терещенко. Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН, Мурманск, РФ
Email: Vladimir.safargaleev@pgia.ru

волн коротковолнового (КВ) диапазона, интенсивно развиваются в последние два-три десятилетия. Вследствие поглощения ионосферой энергии излучаемых радиоволн в ней инициируются различные физические явления (см., например, обзор [2]). Изучение эффектов нагрева позволяет лучше понять строение ионосферы и природу протекающих в ней естественных процессов. Кроме того, эксперименты по искусственной модификации ионосферы имеют и прикладное значение. Например, одно из проявлений нагрева — генерация искусственных ионосферных неоднородностей — находит практическое применение при изучении влияния естественных ионосферных неоднородностей на функционирование радионавигационных спутниковых систем.

Сосредоточение различного рода диагностических средств в Северной Скандинавии стимулировало в своё время строительство нагревного стенда у радара EISCAT около Тромсё (Норвегия). Круг задач, решаемых с помощью данной установки, широк, но участие российских учёных в проводимых здесь экспериментах остаётся ограниченным и сводится к эпизодическим экспедициям. Отсутствие необходимой портативной мобильной аппаратуры, слабое финансирование, таможенные формальности — вот неполный список проблем, которые явились причиной низкой активности отечественной академической науки в исследованиях авроральной ионосферы методами активного воздействия.

Тенденция к изменению ситуации в лучшую сторону наметилась после 2004 г. с запуском проекта SPEAR (Space Plasma Exploration by Active Radar). Сконструированный в рамках проекта нагревный стенд SPEAR располагается у радара ESR (EISCAT Svalbard radar) около посёлка Лонгьербиен (Шпицберген). География нагревных экспериментов распространилась в чрезвычайно интересную с геофизической точки зрения область каспа (в дневные часы) и границы между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями (в ночные часы). Несколько лет ранее Полярный геофизический институт (ПГИ) Кольского научного центра РАН возобновил научные исследования в обсерватории "Баренцбург" (BAB), расположенной примерно в 40 км к западу от SPEAR. Первый совместный эксперимент по регистрации возможных эффектов модификации ионосферы нагревным стендом SPEAR был проведён в феврале — марте 2007 г. К этому времени обсерватория ПГИ уже обладала комплексом измерительных средств, включающим в себя разнообразную оптическую, магнито- и радиометрическую аппаратуру.

Ионосфера относится к числу факторов, в значительной степени определяющих распространение радиоволн. Ионосфера высоких широт представляет собой более изменчивое образование, нежели среднеширотная ионосфера. Проведение на архипелаге Шпицберген томографических исследований ионосферных неоднородностей, а также исследований особенностей возбуждения и распространения электромагнитных волн в крайне- и сверхнизкочастотном (КНЧ — СНЧ) диапазоне в волноводе Земля — ионосфера представляет практическую ценность для решения задач радиосвязи, радиолокации и радионавигации в Арктике.

Все вышесказанное определяет интерес мирового геофизического сообщества к исследованиям на Шпицбергене, который сегодня реализовался в создании на архипелаге одного из самых лучших и удобных между-

народных научных полигонов в Арктике с развитой инфраструктурой и крепкими интернациональными связями. Новый этап исследований ПГИ на Шпицбергене начался в 2000 г. в связи с постановлением правительства Российской Федерации "О финансировании деятельности российских организаций на архипелаге Шпицберген" и созданием Межведомственной комиссии по обеспечению российских интересов, производственной и научной деятельности на архипелаге. Именно тогда были заложены основы самой северной российской комплексной геофизической обсерватории. Сейчас эта обсерватория, оснащённая обширным арсеналом наблюдательных средств, является неотъемлемой частью международной геофизической платформы (рис. 1).

Основой регулярных наблюдений ПГИ в Баренцбурге служит комплекс, в состав которого входят магнито-вариационная станция и индукционные магнитометры, радиотомографический приёмный пункт, приёмник сигналов навигационных систем GPS (Global Positioning System) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система), разнообразная оптическая аппаратура, датчик электрического поля, нейтронный монитор, озонметр для регистрации вариаций тропосферного озона. Для проведения специальных экспериментов используются дополнительные приборы, в частности коротковолновая радиоинтерферометрическая установка и прецизионный широкополосный приёмник экстремально низкочастотного диапазона. По экспериментальным материалам, полученным в обсерватории ПГИ за последние несколько лет её функционирования, подготовлено более 40 публикаций и научных сообщений. В следующих разделах мы кратко опишем те из них, которые по нашему мнению представляют заметный шаг вперёд в сформулированных выше трёх научных направлениях: исследовании космической погоды, искусственной модификации ионосферы КВ-волной и распространении КНЧ-волн в ионосферном волноводе. В заключение данного раздела отметим, что организация и проведение наблюдений в суровых условиях Арктики требуют больших усилий и самоотверженности исследователей. Поэтому авторы используют данную этой статьёй возможность выразить благодарность сотрудникам ПГИ, чья профессиональная деятельность способствовала развитию обсерватории и получению данных высокого качества.

2. Комплексные исследования ионосферных возмущений, связанных с процессами на магнитопаузе и в прилежащих к ней доменах

Заметную часть научных результатов ПГИ, полученных на Шпицбергене, составляют результаты, основанные на данных ежегодных совместных кампаний по исследованию динамики дневных полярных сияний в контексте ионосферной конвекции. Кампании организуются университетом г. Оулу (Финляндия) и Шведским институтом космической физики (г. Кируна, Швеция). Эти научные учреждения являются членами Международной ассоциации EISCAT, и с ПГИ их связывают давние партнёрские отношения.

В кампаниях задействованы обе антенны радара ESR в Лонгьербиене и радар EISCAT в Тромсё. Подвижная антенна ESR, которая ориентируется вдоль геомагнит-

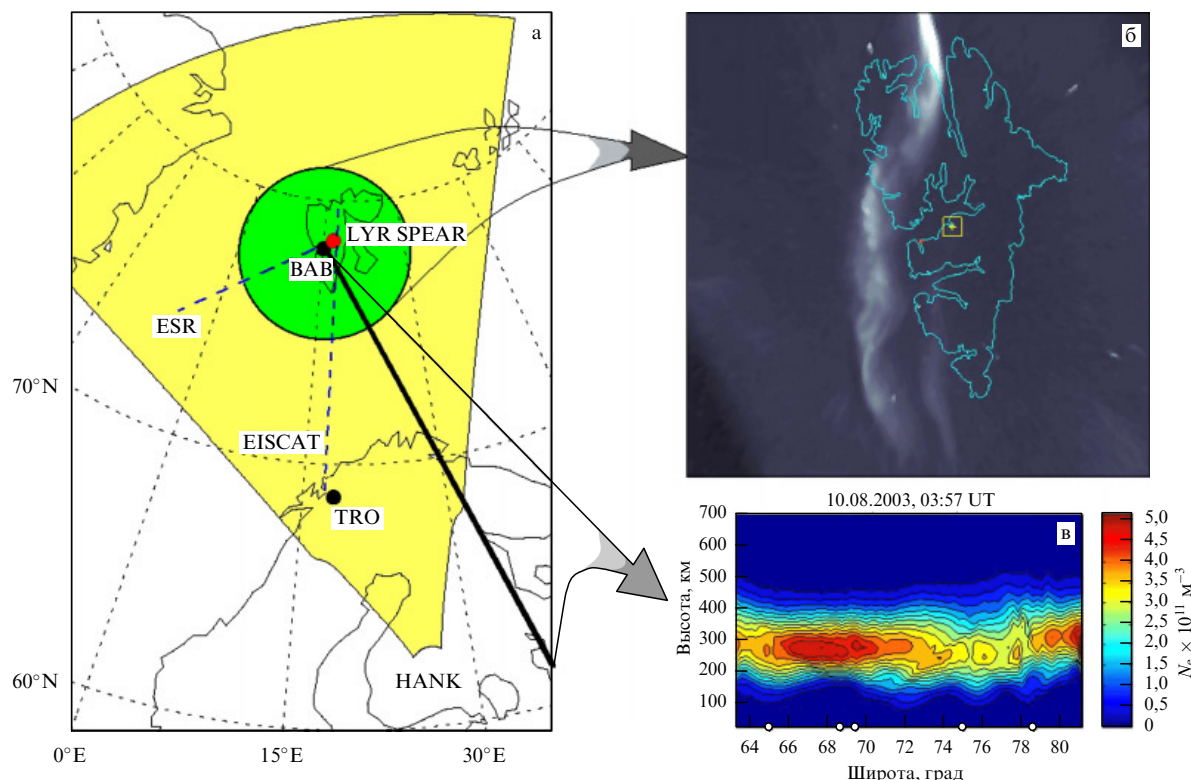


Рис. 1. (а) Положение обсерватории "Баренцбург" (BAB) и нагревного стенда SPEAR относительно поля зрения радаров HANK, ESR и EISCAT. Жирной линией показан профиль, вдоль которого располагаются пункты томографической цепочки ПГИ. Круг соответствует полю зрения телевизионной камеры ПГИ. (б) Спроектированный телевизионный кадр, на котором квадратом схематически обозначен нагревный стенд SPEAR. (в) Пример томографической реконструкции ионосферных неоднородностей; точками на горизонтальной оси показаны приёмные пункты.

ной широты или под небольшим углом к ней, измеряет скорость конвекции плазмы вдоль авроральных дуг. Антенна радара в Тромсё наклоняется таким образом, чтобы её луч пересекал вертикальный (или наклонный, в зависимости от задачи) луч антенны ESR на высоте 120–150 км и измерения проходили в поле зрения камеры полного обзора неба, установленной в Баренцбурге (рис. 1а). В таких экспериментах важную роль играет корректное сопоставление в пространстве областей оптических и радарных измерений. С этой целью производится точная привязка телевизионной камеры по сторонам света с помощью разработанного шведскими коллегами пакета программ — так называемая геометрическая калибровка камеры. В результате калибровки каждому пикселу изображения ставится в соответствие точка на поверхности Земли с определёнными координатами. После этого сопоставление изображения сияний с радарными и спутниковыми измерениями особых трудностей не представляет.

Взаимодействие солнечного ветра с дневной магнитосферой — процесс непрерывный, но он проявляется наиболее ярко во время отчётливых изменений параметров межпланетной среды, таких как резкая смена знака ММП или скачок давления солнечного ветра. Теоретически считается, что поступление энергии и плазмы солнечного ветра в магнитосферу происходит во время пересоединения силовых линий земного и межпланетного магнитных полей. В упрощённом варианте это выглядит так. При южном ММП пересоединение имеет место в окрестности подсолнечной точки, пересоединив-

шиеся силовые линии сносятся солнечным ветром через полярную шапку в хвост, где их накопление трактуется как увеличение магнитной энергии. При этом количество замкнутых силовых линий на дневной стороне уменьшается и касп смещается в область более низких широт. При северном ММП пересоединение происходит за каспами. Плазма солнечного ветра, находящаяся на примыкающих к магнитопаузе силовых линиях ММП, оказывается на вновь образовавшихся замкнутых силовых линиях, что трактуется как захват плазмы переходного слоя. Увеличение количества замкнутых силовых линий в дневной магнитосфере приводит к смещению каспа в высокие широты.

Картина усложняется, если учесть крупномасштабную магнитосферную конвекцию, которая при южном ММП не даёт силовым линиям "скапливаться" на ночной стороне, а при северном ММП уносит "излишек" замкнутых силовых линий с дневной стороны на ночную. Конвекция может играть и положительную роль. Вследствие вмороженности магнитного поля в плазму, магнитосферная конвекция находит своё отображение в крупномасштабном движении ионосферной плазмы. Поэтому свойство конвекции реагировать определённым образом на изменения ММП может быть использовано как дополнительный источник информации при исследовании процессов взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы наземными средствами.

Одним из наиболее эффективных способов изучения процессов на магнитопаузе и в прилежащих к ней доменах традиционно считается исследование струк-

туры и динамики дневных полярных сияний. В контексте вышесказанного — это исследование отклика сияний на смену знака ММП. Теоретически схема взаимодействия солнечного ветра выглядит понятной, но при попытке её исследовать экспериментально возникают трудности технического характера. Во-первых, резкая смена знака ММП, как правило, происходит на фронте неоднородности солнечного ветра и сопровождается заметным изменением плазменного давления. В результате мы видим в сияниях суммарный эффект переворота поля и скачка давления. Во-вторых, при расчёте времени начала взаимодействия неоднородности с магнитопаузой возникает неопределённость из-за погрешности расчёта времени распространения неоднородности, поскольку обычно привлекаются данные спутника ACE (Advanced Composition Explorer), производящего измерения на расстояниях $250 R_E$ (R_E — радиус Земли).

Третья сложность обусловлена следующим фактором. Источник дневных сияний располагается в окрестности дневного каспа или вблизи границы полярной шапки (см., например, [3]). Магнитосфера здесь состоит из слоёв, размеры которых в проекции на ионосферу малы, что затрудняет ассоциацию источника сияний с каким-либо из магнитосферных доменов. Ошибочное сопоставление может приводить к неправильной интерпретации наблюдаемых оптических явлений.

Типичной формой дневных сияний являются так называемые движущиеся к полюсу квазипериодические

авроральные структуры (*poleward-moving auroral forms*, PMAF). В пионерских работах по исследованиям дневных сияний на Шпицбергене была высказана гипотеза о том, что причиной авроральной активности вида PMAF может являться пересоединение [4]. Дальнейшая эксплуатация этой гипотезы группой исследователей из Норвегии, имеющей развитую сеть оптических наблюдений на Шпицбергене, привела к тому, что сегодня практически каждый случай околополуденных PMAF рассматривается как ионосферная манифестация пересоединившихся силовых трубок, дрейфующих в магнитосферный хвост, даже несмотря на неоднозначность интерпретации по указанным выше причинам. Попытка преодолеть такой подход была предпринята в работах [5, 6], где описаны случаи, когда структуры наблюдались на замкнутых силовых линиях, а их динамика не обуславливалась только конвекцией. Эти работы продемонстрировали важность проведения оптических исследований в комбинации с другими измерениями и инициировали идею организации регулярных совместных кампаний на Шпицбергене.

Явление, о котором пойдёт речь ниже, было обнаружено во время одной из кампаний и представляло собой уникальную ситуацию, в которой обозначенные выше сложности практически отсутствовали. Во-первых, оказалось, что мы имеем дело с откликом только на изменения ММП. Во-вторых, мы использовали данные спутника "Geotail", находившегося недалеко от магнито-

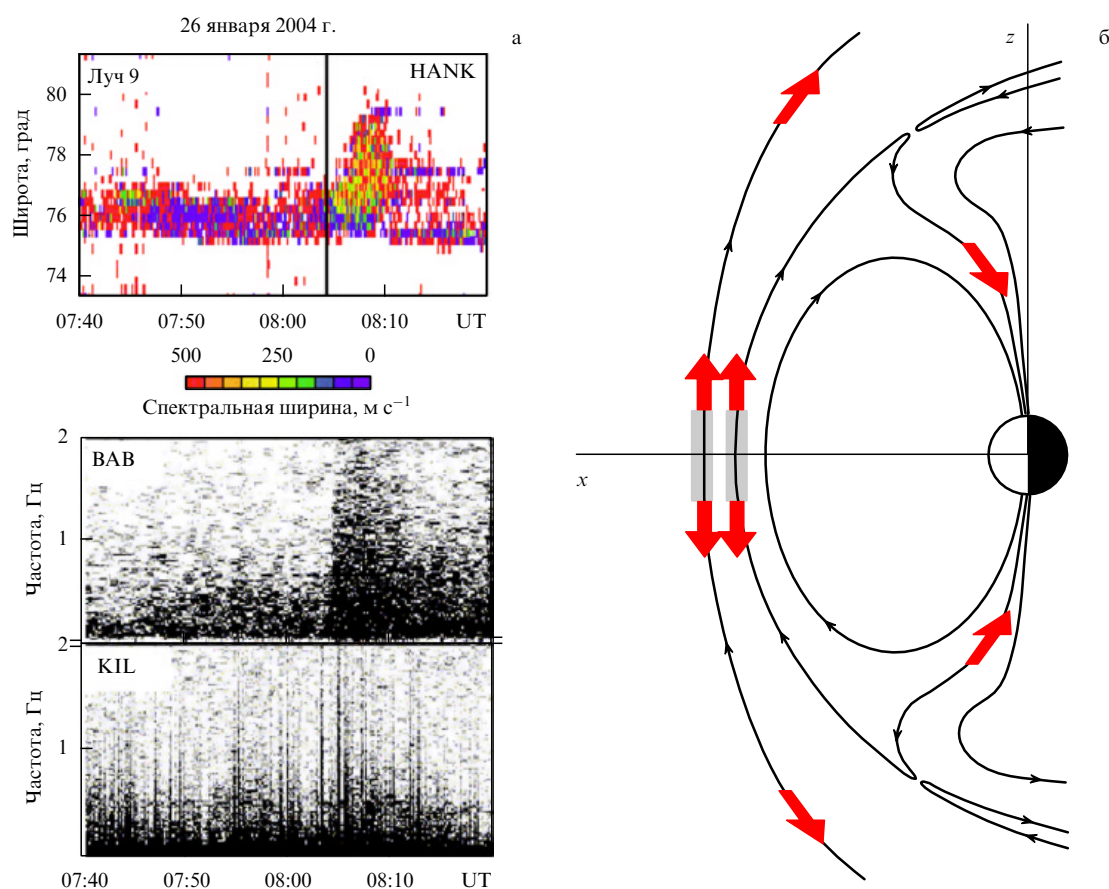


Рис. 2. (а) Аномальное эхо в данных радара HANK и волновая активность в Баренцбурге (BAB) и на авроральной станции Килписъярви (KIL). (б) Схема, иллюстрирующая "захват" анизотропной плазмы солнечного ветра (серая область) и попадание герцевых волн в высокоширотную ионосферу (жирные стрелки) в ходе пересоединения при северном ММП.

паузы. Это позволило с достаточной степенью уверенности связать PMAF именно с поворотом ММП к северу, что позднее подтвердила картина ионосферной конвекции, восстановленная по радарным данным. В-третьих, незадолго до начала явления над сияниями пролетел спутник серии DMSP (Defense Meteorological Satellites Program), по данным которого формы находились на замкнутых силовых линиях.

Для интерпретации результатов оптических наблюдений были дополнительно привлечены данные радара HANK, являющегося частью системы SuperDARN, и данные финской сети индукционных магнитометров, дополненной магнетометром ПГИ в Баренцбурге. В результате такого комплексного подхода к анализу явления мы пришли к следующему заключению (см. также работу [7]). После поворота к северу B_z -компоненты ММП радар HANK зафиксировал в ионосфере над Шпицбергом неоднородность в виде аномалии в спектре отражённого сигнала. Появление аномалии сопровождалось всплеском активности в герцевом диапазоне, причём только в Баренцбурге, т.е. на самом высокоширотном индукционном магнитометре (рис. 2а). Аномальное эхо и всплеск геомагнитной активности были обусловлены захватом анизотропной плазмы переходного слоя, происходящим по схеме, представленной на рис. 2б. Дрейфуя вдоль границы между bps (*boundary plasma sheet* — пограничный плазменный слой) и lbl (*low latitude boundary layer* — низкоширотный пограничный слой), ступок плазмы вызвал расширение последнего и, как следствие, смещение источника существовавших до этого трёх авроральных дуг (рис. 3б).

Данное оптическое явление действительно выглядит на кеограмме как типичное PMAF (рис. 3а). Отметим, что вариация ММП имела вид кратковременного положительного импульса. При использовании данных далёких спутников ACE и "Wind" из-за большой погрешности расчёта времени распространения неоднородности до

магнитопаузы и в отсутствие дополнительных радарных данных о характере ионосферной конвекции вполне допустимо связать PMAF по времени с задним фронтом неоднородности, т.е. с поворотом ММП к югу. В этом случае динамику дуг можно объяснить дрейфом пересединившихся силовых линий в хвост, а аномальное эхо в данных HANK и всплеск магнитной активности в Баренцбурге связать со смещающимся в область низких широт каспом. Таким образом, проведённое нами исследование представляется методологически важным для проведения диагностики процессов на магнитопаузе средствами наземного базирования.

3. Исследования ионосферы над Шпицбергом методом активного воздействия

В наше время научный прогресс в целом определяется не только усовершенствованием наблюдательной техники, но и во многом зависит от международной кооперации. Наряду с исследованиями космической погоды, ещё одним ярким примером интернационального подхода к решению важных проблем геофизики на Шпицбергене явились работы по модификации полярной ионосферы мощным КВ-излучением.

Активное воздействие на ионосферу с целью изучения свойств этой природной плазменной оболочки используется в геофизике начиная с 1980-х годов. Но на Шпицбергене, в области каспа и полярной шапки, нагревная установка SPEAR начала работать только в 2004 г. Искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) — широкополосное шумоподобное излучение, возникающее в результате возбуждения ионосферной плазмы мощным электромагнитным излучением, было открыто в ходе нагревных экспериментов на стенде EISCAT в Тромсё [8]. Хотя интерес к пространственным характеристикам этого излучения существовал с момента его открытия, на протяжении многих лет наблюдения ИРИ ограничивались измерениями интенсивности сигнала, выделением различных спектральных компонент излучения, исследованием динамики излучения и т.п. Локализация области генерации ИРИ долго оставалась нерешённой проблемой из-за высоких требований к аппаратуре.

Коротковолновая радиоинтерферометрическая установка, способная определять направление приходящего сигнала фазоразностным методом, была создана в ПГИ в 2002–2003 гг. Интерферометр работает в диапазоне частот от 1,5 до 32 МГц с полосой около 300 кГц и имеет широкий динамический диапазон (около 100 дБ). Установка позволяет проводить фазоразностные и амплитудные измерения сигналов как искусственного, так и естественного происхождения.

В феврале–марте 2007 г. Полярный геофизический институт принял участие в эксперименте по нагреву ионосферы на архипелаге Шпицберген. К этому моменту нами был накоплен немалый опыт, аппаратура прошла испытания в средних и авроральных широтах во время нагревных экспериментов на установках "Сура" и EISCAT. В области полярной шапки подобные наблюдения являлись беспрецедентными. Хотя мощность нагревной установки составляла лишь две трети от проектной мощности (эффективная мощность излучения лишь незначительно превышала 10 МВт), нам удалось уверенно

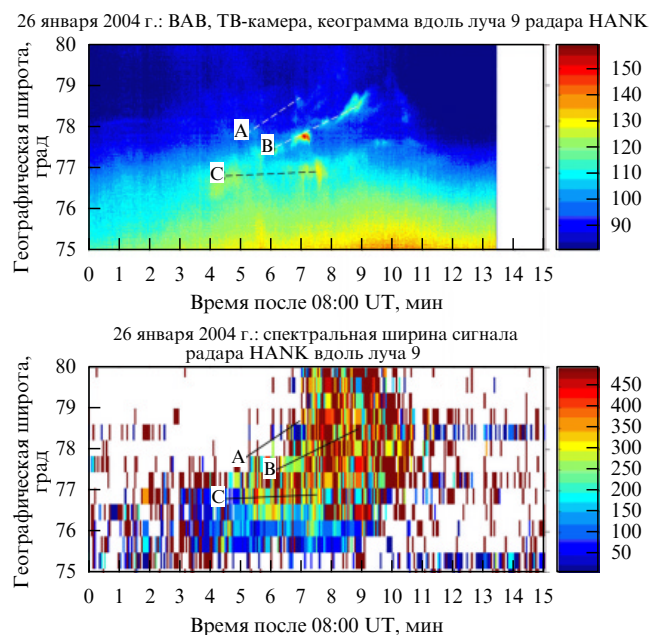


Рис. 3. Кеограмма, иллюстрирующая динамику трёх авроральных дуг: А, В и С, вдоль девятого луча радара HANK, (а) и взаимное движение дуг и области аномального радарного эха (б).

зарегистрировать искусственное радиоизлучение ионосферы [9].

Искусственное радиоизлучение ионосферы представляет собой слабый, шумоподобный сигнал в полосе частот ≈ 200 – 300 кГц, с амплитудой примерно на 60 дБ меньшей амплитуды отражённой от ионосферы волны нагревного стенда. Излучение и характер его спектральных особенностей зависят в значительной мере от нелинейных процессов, возбуждаемых в ионосферной плазме в результате нагрева, а также от значения плазменной частоты, локальной гармоники гирочастоты и ориентации силовых линий геомагнитного поля относительно направления излучения нагревной установки.

В качестве примера на рис. 4а представлен спектр искусственного радиоизлучения, зафиксированного 9 марта 2007 г. при частоте нагрева 4,45 МГц, эффективно излучаемой мощности нагревной установки 13 МВт и излучении, направленном вдоль силовых линий геомагнитного поля. На рисунке хорошо видны характерные особенности стационарного спектра искусственного радиоизлучения, такие как главный ионосферный максимум DM (Downshifted Maximum) и его вторая гармоника 2DM, широкополосные сигналы в области отрицательных и положительных отстроек по частоте BC (Broad Continuum) и BUM (Broad Upshifted Maximum) соответственно, а также максимум в области

положительных отстроек по частоте UM (Upshifted Maximum). Центральная часть спектра, соответствующая отражённой от ионосферы нагревной волне, подавлена режекторным фильтром, установленным на промежуточной частоте радиоприёмного устройства КВ-интерферометрической установки.

Регистрация ИРИ установкой ПГИ, работавшей в то время в Баренцбурге в неполной комплектации, показала принципиальную возможность возбуждения ИРИ нагревом в геофизических условиях Шпицбергена. В сегодняшней модификации установка способна регистрировать не только сам факт генерации ИРИ, но и определять направление на его источник в ионосфере (рис. 4б), как это было сделано во время одного из экспериментов на нагревном стенде EISCAT [10].

4. Особенности распространения в высоких широтах искусственного электромагнитного сигнала в диапазоне 0,1–10 Гц

Распространение волн различного частотного диапазона изучается с привлечением теоретических (численных) моделей ионосферы. Постоянное совершенствование моделей для того, чтобы они максимально адекватно отображали реальные ситуации, имеет важное прикладное значение. Известно, что спектр приземного фонового шума в интервале частот 0,1–10 Гц обладает рядом особенностей, обусловленных строением ионосферы. Как известно из теории [11], для волны, принадлежащей диапазону от 0 до 10 Гц, в ионосфере имеются две области отражения. Первая отражающая область, в которой электронная концентрация возрастает с увеличением высоты, лежит ниже максимума F-слоя, формируя для волн данного диапазона волновод Земля–нижняя ионосфера. Существование второй отражающей области обусловлено характерным спадом электронной концентрации выше максимума F-слоя. Вместе с первой областью эта область формирует внешний волновод — ионосферный альвеновский резонатор (ИАР). Интерференция волн, отражающихся от стенок резонатора, приводит к немонотонной зависимости амплитуды от частоты — формированию так называемых спектрально-резонансных структур в шумовом фоне. Вероятно, что схожее влияние ИАР может оказывать и на сигналы искусственного происхождения данного диапазона.

С целью проверки этой гипотезы в сентябре 2007 г. был проведён комплексный эксперимент по генерации и приёму электромагнитного излучения экстремально низкочастотного диапазона на частотах 0,1–200 Гц. В качестве излучающей антенны в эксперименте была использована заземлённая на концах высоковольтная ЛЭП Л-401 длиной около 107 км, расположенная в северной части Кольского полуострова и ориентированная преимущественно в направлении запад–восток (рис. 5а). Квазимонохроматический ток в антенне создавался передатчиком экстремально низкочастотного диапазона мощностью 100 кВт. Излучение происходило на нескольких частотах в диапазоне 0,1–10 Гц, амплитуда тока в этом диапазоне составляла 150–180 А.

Измерения напряжённости создаваемого антенной магнитного поля проводились на расстоянии 1200 км от передатчика — в обсерватории "Баренцбург" — посредством трёхкомпонентного индукционного магнито-

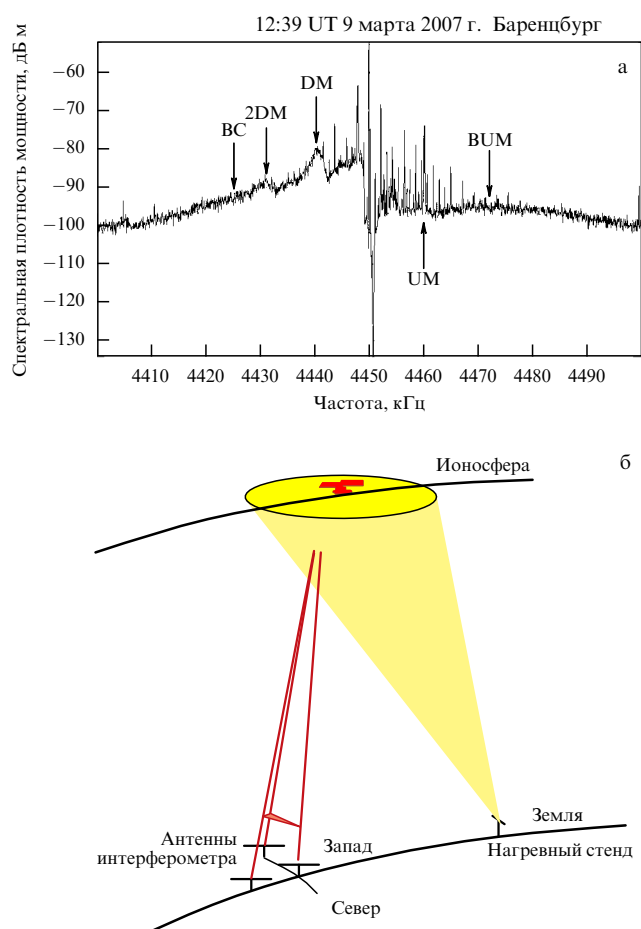


Рис. 4. (а) Спектральная плотность мощности ИРИ, зарегистрированного 9 марта 2007 г. в 12:39 UT в обсерватории "Баренцбург". (б) Схема эксперимента по локализации источника ИРИ интерферометрической установкой ПГИ.

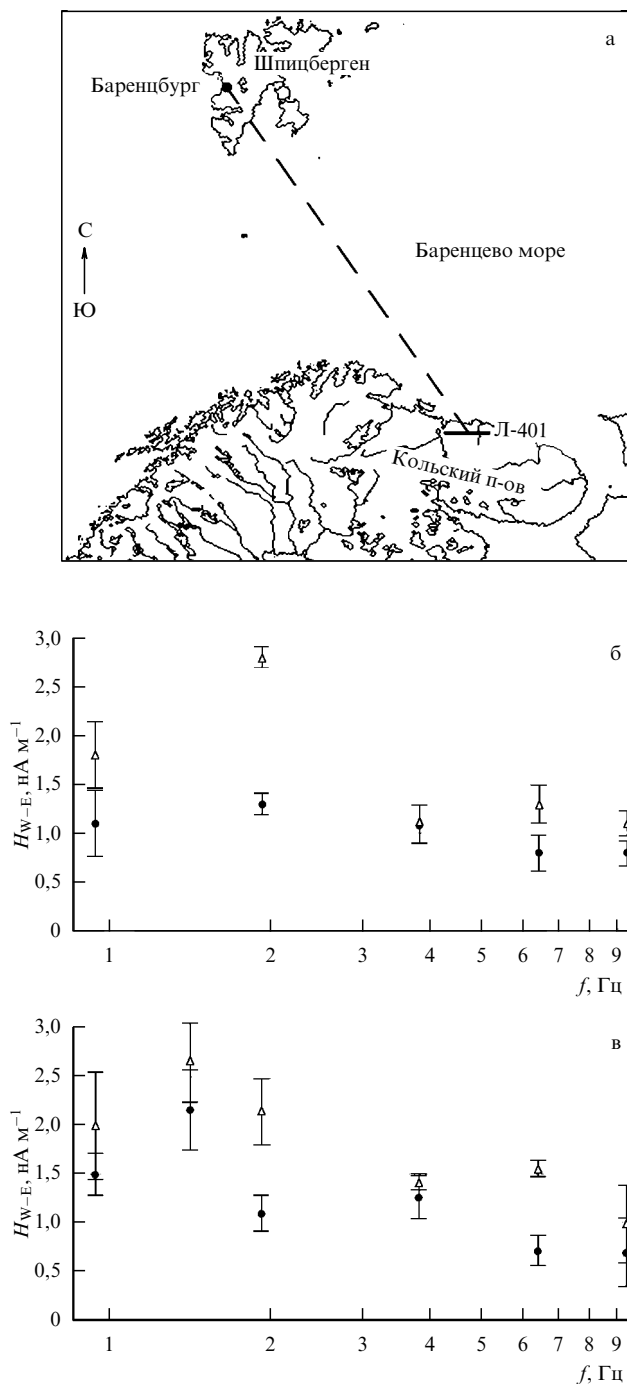


Рис. 5. Схема экспериментов по излучению и приёму КНЧ-сигнала (а) и результаты измерений амплитуды сигнала, принятого 5 и 6 сентября 2007 г. (б) и 18 и 20 августа 2009 г. (в).

метра. Эксперименты по излучению проводились в течение нескольких дней преимущественно в ночные часы, когда вероятность образования ИАР велика.

Главный результат экспериментов состоит в том, что в ряде случаев для горизонтальной компоненты магнитного поля принимаемого сигнала была обнаружена немонотонная зависимость амплитуды сигнала от частоты (рис. 5б, в). Мы полагаем, что причина этого — влияние на распространяющийся сигнал ионосферного альвеновского резонатора, поскольку схема эксперимента позволила исследовать поле в области, где вклад

в результирующее поле от волны, распространяющейся во внешнем волноводе (выше F-слоя), становится значимым.

Нами также была оценена эффективность использования различных ионосферных моделей для интерпретации результатов проведённых измерений. Показано, что результаты расчётов, выполненных с помощью модели IRI (International Reference Ionosphere), плохо согласуются с данными эксперимента. Расчёт по модели UAM (Upper Atmosphere Model) лучше соответствует эксперименту, но и он не свободен от недостатков, поэтому необходимо использовать результаты экспериментальных исследований ионосферы (таких как спутниковая томография и др.) для уточнения ионосферных характеристик, полученных в результате модельного расчёта.

5. Будущее геофизических исследований на Шпицбергене

Будущее геофизических исследований на Шпицбергене видится, прежде всего, в усилении международной кооперации. Прошло то время, когда наблюдения проводились изолированно, а к анализу явлений привлекались данные одного-двух инструментов. Исследования российских, норвежских, шведских, финских и китайских учёных убедительно демонстрируют эффективность координированных наблюдений и комплексного подхода к анализу данных. Понимая это, Исследовательский совет Норвегии выступил в 2009 г. с инициативой объединения максимально возможного числа из функционирующих на Шпицбергене обсерваторских пунктов в единую измерительно-информационную систему с целью глобального моделирования атмосферы Арктики. Проект под названием SIOS (Svalbard Integrated Observing System) получил финансовую поддержку Европейского союза. Полярный геофизический институт является членом Консорциума по проведению предварительной фазы проекта, входя в группу по исследованию степени влияния магнитосферных процессов на климат Арктики.

Список литературы

1. Куницын В Е, Терещенко Е Д, Андреева Е С *Радиотомография ионосферы* (М.: Физматлит, 2007)
2. Фролов В Л и др. *УФН* **177** 330 (2007) [Frolov V L et al. *Phys. Usp.* **50** 315 (2007)]
3. Sandholt P E et al. *J. Geophys. Res.* **103** (A10) 23325 (1998)
4. Vorobjev V G et al. *Planet. Space Sci.* **23** 269 (1975)
5. Kozlovsky A, Kangas J J. *Geophys. Res.* **107** (A2) 1017 (2002)
6. Kozlovsky A E et al. *Ann. Geophys.* **21** 2303 (2003)
7. Safargaleev V et al. *Ann. Geophys.* **26** 517 (2008)
8. Thidé B, Kopka H, Stubbe P *Phys. Rev. Lett.* **49** 1561 (1982)
9. Tereshchenko E D et al., in *VII Intern. Suzdal URSI Symp. "Modification of Ionosphere by Powerful Radio Waves", Book of Abstracts* (Moscow, 2007) p. 42
10. Tereshchenko E D et al. *Ann. Geophys.* **24** 1819 (2006)
11. Поляков С В, Раппопорт В О *Геомагнетизм и астрономия* **21** 610 (1981)