Радиофизика и радиоастрономия, 1997, т. 2, №3, 255-266

УДК550.338

Научные исследования на украинской антарктической станции Академик Вернадский

Г. П. Милиневский

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко
252022 Киев, пр. Акад. Глушкова, 6,
Украинский антарктический центр
252113 Киев, ул. Щорса, 31

Статья поступила в редакцию 24 сентября 1997 г.

В статье представлены события передачи Украине британской антарктической станции Фарадей и 1-й украинской зимовки на ней 1996/97 годов. Обсуждаются возможности научных исследований на станции, которые появились в результате передачи Британской антарктической службой Украинскому антарктическому центру оборудования для исследований геокосмоса: ионозонда, магнитометров, широкополосного ОНЧ (СДВ) приемника, аппаратуры для исследования ионосферы с использованием эффекта "тримпи". Это оборудование было передано, чтобы не прерывать наблюдения проводимые на станции с 1957 года. С конца ноября 1995 года исследования с помощью ионозонда, магнитометров, широкополосного ОНЧ-приемника, озоновые и метеоизмерения на станции Фарадей начали выполнять украинские ученые. Процесс передачи станции был успешно завершен 6 февраля 1996 года, и в этот день станция была переименована в Академик Вернадский. В статье представлены результаты озоновых измерений, производимых на станции с помощью спектрофотометра Добсона, который также был передан Украине.

В статті наведено події передачі британської антарктичної станції Фарадей Україні та 1-ї української зимівлі на ній 1996/97 років. Розглядаються можливості наукових досліджень на станції, які виникли в результаті передачі Британською антарктичною службою Українському антарктичному центру обладнання для досліджень геокосмосу: іонозонда, магнітометрів, широкополосного ДНЧ (НДХ) приймача та апаратури для досліджень іоносфери з використанням ефекту "трімпі". Це обладнання було передане щоб не переривати серію спостережень, що виконуються на станції з 1957 року. З кінця листопада 1995 року спостереження за допомогою іонозонду, магнітометрів, широкополосного ДНЧ-приймача, озонові та метеоспостереження на станції Фарадей почали виконувати українські вчені. Процес передачі станції був успішно завершений 6 лютого 1996 року і в цей день станція була перейменована в Академік Вернадський. У статті наведено результати озонових вимірів, що проводяться на станції за допомогою спектрофотометра Добсона.

Введение

Факт возвращения Украины в ряд антарктических государств будет оценен в будущем. Главным в этом событии был долгий и трудный процесс передачи британской станции Фарадей Украине, который завершился 6 февраля 1996 года поднятием украинского флага над станцией, которая получила название Академик Вернадский. Для осуществления этого важного для Украины проекта работало много людей, без заинтересованности и настойчивости которых процесс возвращения Украины в Антарктиду был бы отложен на долгие годы. В этой статье коротко представлены события этого процесса, а также описаны направления научных исследований, проводившихся во время первой украинской зимовки 1996/97 гг. на станции Академик Вернадский.

1. Антарктическая станция Академик Вернадский

Станция Академик Вернадский (до 6 февраля 1996 года - британская база Фарадей) находится на Аргентинских островах (65°15′ S, 64°16′ W), которые представляют собой группу небольших островов, расположенных в нескольких километрах от гористого западного побережья Антарктического полуострова (рис. 1). Большинство островов покрыто ледовыми шапками, наивысшая точка - остров Уругвай высотой 65 метров. Ближайший пункт Антарктического полуострова - мыс Туксен - расположен на расстоянии около 7 километров от станции.

По данным Британской антарктической службы (БАС) научная база на Аргентинских островах вблизи Антарктического полуострова появилась во время Британской экспедиции на Землю Грейама в 1934-37 гг. Непрерывная работа на станции началась с 1947 года на острове Винтер. База на Аргентинских островах с 9 января 1947 года работала как постоянно действующая метеорологическая станция. К зимовке 1953-54 гг. станция была перенесена на мыс Марина острова Галиндез, где и находится сейчас. Это самая старая станция, постоянно работающая на Антарктическом полуострове. С 1953 года здесь было построено еще

© Г. П. Милиневский, 1997

несколько зданий, а большинство существующих сейчас жилых и рабочих строений появилось в 1979-80 годах. На станции может постоянно работать до 24 человек.

Станционный комплекс зданий состоит из девяти строений, стоящих на каменном основании острова Галиндез (рис. 2). В 1980 году было проведено значительное расширение площади зданий и установлено дополнительное научное и вспомогательное оборудование. Было построено двухэтажное здание с бойлерной, биолабораторией и складом для одежды на первом этаже, и кухней, столовой, библиотекой и кают-компанией на втором. После этого в старом здании расширились

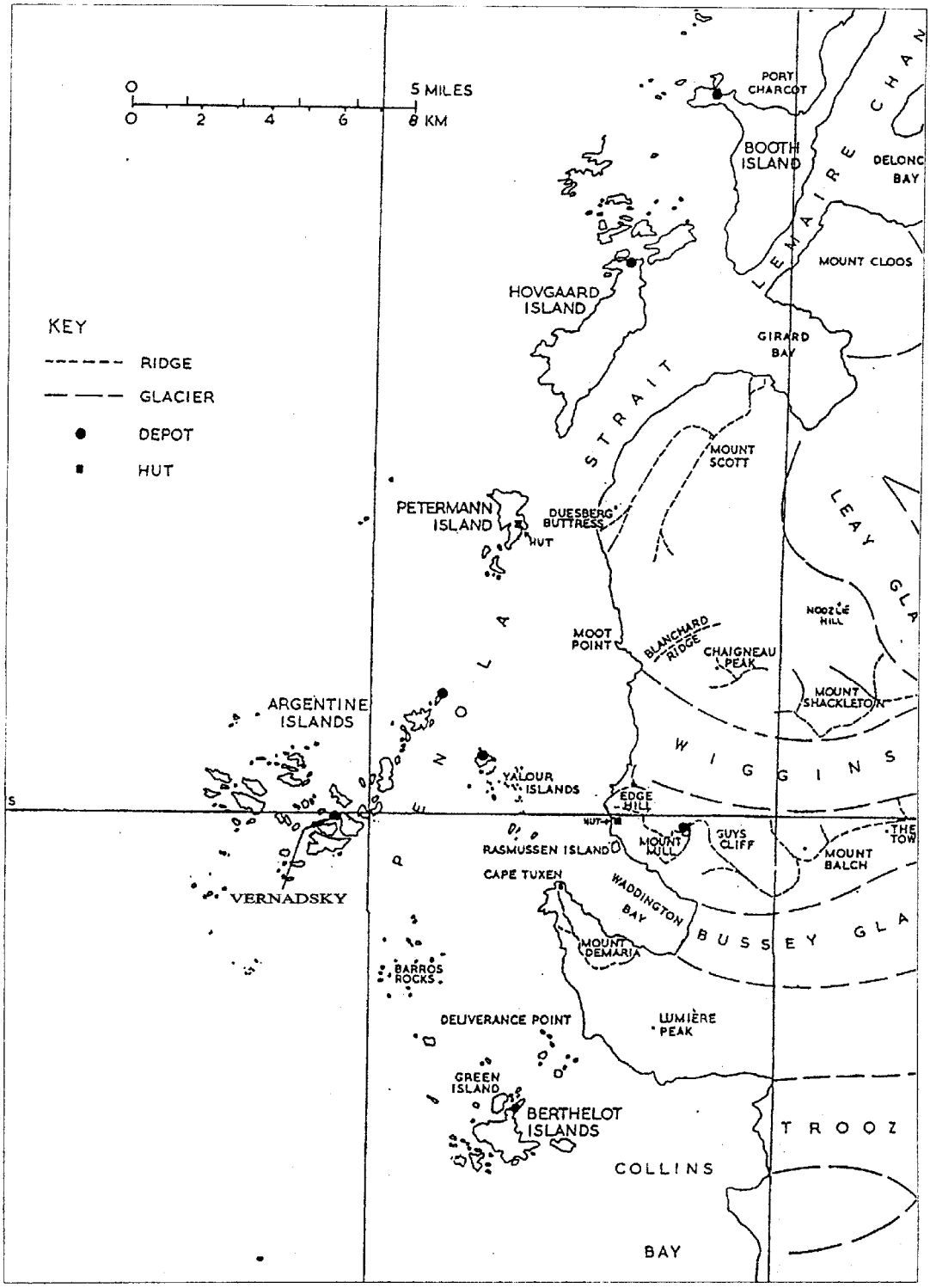

Рис. 1. *Расположение станции Академик Вернадский и окрестности Антарктического полуострова*

Рис. 2. *Станционный комплекс зданий на о. Галиндез*

площади для лабораторий, медкабинета и душевых. Было смонтировано центральное отопление на дизтопливе. На территории станции также расположены два немагнитных здания, домик ОНЧ-лаборатории, старое здание генераторной, в котором размещены два холодильника и которое используется также в качестве столярной мастерской, здание аварийной базы, используемое для хранения крупногабаритных деталей антенн и аварийных запасов продуктов. В 1984 году был установлен небольшой домик в качестве аварийной базы на полуострове в 9 км от станции Расмуссен хат. Во время 1-й украинской зимовки 1996 года на берегу пролива Мик была построена сауна.

Источником электроэнергии на станции служат три дизельгенератора (240/415 В, 50 Гц трехфазного тока) мощностью 100 кВт каждый.

Из справки о климатических условиях за период 1947-90 гг.: среднегодичная температура –4,3 °С, среднемесячная летом от –1 °С до +2 °С, зимой температура может изменяться в зависимости от состояния морского льда в пределах от –5 °С до –20 °С. Снег идет около 255 дней в году, дождь - 85 дней, а число солнечных часов в году - около 825 (один месяц).

Аргентинские острова - место очень ветреное, самые сильные ветры дуют с севера и северо-востока (с Тихого океана). В среднем штормовые ветры наблюдаются 15 дней в году. Самая низкая температура, когда-либо наблюдавшаяся в районе Аргентинских островов: –43,3 °С (1958 г.), самая высокая: +11,8 °С (1985 г.). Средняя скорость ветра - 7,7 узлов (4,0 м/с), максимальная средняя скорость ветра за час - 50 узлов (25,7 м/с), максимальный порыв ветра - 76,2 узла (39,1 м/с).

Размеры и рельеф островов не позволяют использовать воздушный транспорт, за исключением вертолетов.

На станции Фарадей Британской антарктической службой проводились научные исследования по направлениям: наземная метеорология, измерения озона и ультрафиолетового излучения, геомагнетизм, исследования ионосферы (ионосферные токи, плазменные неоднородности, ионосферные бури), акустические гравитационные волны в термосфере и долговременные изменения в верхней атмосфере, приливы, ОНЧ-измерения, сбор образцов изотопов в атмосферной пыли, атмосферная турбулентность, психология и физиология человека, различные биологические исследования. Многие из этих исследований сейчас продолжаются украинскими учеными.

2. Хронология передачи станции Фарадей Украине

После провозглашения Украиной независимости 24 августа 1991 г. Россия объявила себя правопреемницей всех антарктических станций бывшего Советского Союза. Известно, что Украина участвовала во всех антарктических экспедициях бывшего СССР, начиная с самой первой. В Украине создавалось разнообразное оборудование для антарктических исследований, транспортная техника. Стоит упомянуть известные вездеходы "Харьковчанка", многолетний флагман советских антарктических экспедиций "Михаил Сомов", самолеты Ан-2 и Ан-12 - неизменные труженики Антарктиды, все они построены на украинских предприятиях. Многие известные украинские ученые внесли ощутимый вклад в исследования Антарктиды. Естественно, было бы неразумно терять такой потенциал и оказаться вне работ в Антарктике. Поэтому уже в 1992 году многие специалисты, связанные прежде с ледовым континентом, начали действовать, чтобы "вернуть" Украину в Антарктиду. В январе 1992 года авиаинженер КБ "Завод Антонова" Юрий Оскрет пишет открытое письмо Президенту Украины Леониду Кравчуку, где высказывает идею создания украинской антарктической станции, направляет копию письма Президенту НАН Украины Борису Патону и начинает активно пропагандировать эту идею. Была получена действенная поддержка и в октябре 1993 года произошло образование Центра Антарктических Исследований (ЦАИ) при НАН Украины во главе с директором Петром Гожиком и зам. директора Юрием Оскретом.

Следует, однако, отметить, что процесс создания собственной станции вероятно затянулся бы на годы, если бы в ноябре 1993 года Великобритания не распространила предложение о передаче антарктической станции Фарадей одной из "неантарктических" стран. К процессу передачи станции БАС подошел с британской основательностью. Так, для успешной передачи станции с точки зрения безопасности и качественного продолжения научных программ, в БАС, а затем на станцию Фарадей должны были приехать на длительное время четыре специалиста ЦАИ для подробного изучения систем обеспечения станции, научных работ и аппаратуры, дизельного хозяй-

ства и систем связи и передачи данных. Еще одно из событий в этом ряду - в сентябре 1994 года Украина при активной поддержке Великобритании принята в члены SCAR, международного научного комитета, координирующего научные исследования в Антарктике.

ЦАИ, преодолев огромные трудности, связанные с финансированием поездки, в соответствии с требованиями БАС направил в конце 1994 года на ст. Фарадей четверых своих специалистов для ознакомления с научным оборудованием и системами жизнеобеспечения станции. Одновременно в Британии обсуждался текст Меморандума о передаче станции и текст Межправительственного Соглашения между Украиной и Великобританией. Документы о передаче антарктической станции Фарадей Украине не позднее 31 марта 1996 года были подписаны 20 июля 1995 года в Лондоне с украинской стороны Послом Украины Сергеем Комиссаренко и директором ЦАИ Петром Гожиком. ЦАИ начал отбор и подготовку команды зимовщиков 1-й Украинской Антарктической экспедиции. Первая группа зимовщиков в количестве 6-ти человек должна была выехать вначале в Кембридж для изучения научной аппаратуры и оборудования жизнеобеспечения станции, а затем - в Антарктиду для дальнейшего обучения непосредственно на станции и для приема станции. Как всегда, главная трудность - финансирование экспедиции. Из-за нехватки денег было принято решение выезжать пятерым зимовщикам и двумя группами - сначала два геофизика (для стажировки в Кембридже и Эдинбурге в области магнитных и ионосферных измерений) и радист, потом, через неделю, - метеоролог и дизелист-механик. В ноябре 1995 года Роман Братчик, Владимир Бахмутов, Виктор Сытов, Андрей Сидоровский и автор этой статьи вылетели в Лондон, чтобы вернуться на Украину только через полтора года, после зимовки (В. Сытову пришлось вернуться через четыре месяца по состоянию здоровья). 28 ноября 1995 г. первая пятерка зимовщиков прибыла на Фарадей. Уже через месяц украинские специалисты самостоятельно проводили все научные наблюдения и обслуживали системы обеспечения станции. К концу декабря еще четверо зимовщиков прибыли на станцию: инженер-электрик Евгений Гурьянов, метеоролог Владислав Тимофеев, врач Владимир Павлик и повар Владимир Рязанов. 31 января 1996 года был подписан официальный документ передачи станции. С британской стороны акт подписали Дункан Хэйг (последний начальник станции Фарадей), Стив Лукас, Джон Шенклин, с украинской - Геннадий Милиневский (начальник станции Академик Вернадский), Вячеслав Ганичев и Анатолий Писаренко.

Вертолеты с британского судна "Эндуранс" прилетели 6 февраля и начали вывоз небольшого количества груза и британской команды. Под щелчки затворов фотокамер Дункан Хэйг спустил Британский флаг и затем был поднят наш, украинский. Итак, 6 февраля 1996 года в 18 часов 45 минут Украина стала Антарктическим государством. Два года тяжелой работы завершились успешно. Вечером следующего дня туристическим судном "Академик Борис Петров" на станцию прибыла еще четверка зимовщиков: строитель Павел Крушеницкий (зам. начальника станции), метеоролог Александр Янцелевич, гляциолог Леонид Говоруха, инструктор туризма Сергей Гордиенко. Команда собралась в полном составе и началась первая украинская зимовка.

3. Научные исследования на станции Академик Вернадский

В настоящее время на ст. Академик Вернадский проводятся измерения по двум основным научным программам: (1) изучение изменений в окружающей среде в Антарктике и (2) исследование верхней атмосферы.

В соответствии с программой научных работ на зимовку 1996-97 гг. и Меморандумом между БАС и ЦАИ на станции проводились исследования по направлениям: метеорология, измерения озонового слоя, приливы и ледовая обстановка, геомагнетизм, ионосферные исследования (ионосферное зондирование), наблюдение сигналов вистлер-моды, гляциология, астрономия. Для этих измерений использовалось оборудование, оставленное британцами на станции: аналоговый ионозонд, система приемников ОНЧ диапазона, магнитометры, спектрофотометр Добсона, автоматическая станция наблюдения за погодой MAWS, метеорологические инструменты, оборудование для сбора образцов осадков, оборудование записи уровня моря, приемник спутниковой метеорологической информации. Гляциологическое оборудование и высокочувствительная камера с усилителем яркости для астрономических наблюдений были привезены из Украины.

Согласно Меморандуму между БАС и ЦАИ украинские ученые обязались продолжить проводимые ранее англичанами исследования в области ионосферного зондирования, магнитных измерений, метеорологических наблюдений и мониторинга озонового слоя. Тем более, что некоторые наблюдения представляют собой самые длинные ряды данных в Антарктике. Поэтому основными задачами первой зимовки были доскональное изучение научной аппаратуры и оборудования жизнеобеспечения станции в период совместного пребывания на ней британских и украинских полярников, проведение на высоком уровне исследований, выполнение некоторых новых научных программ.

3.1. Исследование верхней атмосферы Земли

Для изучения верхней атмосферы на станции используются: аналоговый ионозонд, приемники ОНЧ диапазона, магнитометры. В соответствии с направлением исследований солнечно-земных связей и верхней атмосферы на ст. Академик Вернадский проводятся экспериментальные исследования происхождения и распространения естественных радиоизлучений, механизмов передачи энергии солнечного ветра через магнитосферу и ионосферные слои в полярных зонах, а также исследования рассеяния радиоизлучения в верхних слоях атмосферы.

Приполярный регион, где расположена станция, является очень интересным для изучения ионосферы, поскольку верхние слои атмосферы в этой области являются средоточием большинства энергетических потоков, проходящих через магнитосферу и ионосферу Земли, и их влияние проявляется в значительном количестве явлений, например, таких как полярные сияния.

Станция Академик Вернадский для исследований ионосферы имеет особые преимущества, так как здесь наблюдается большое расхождение между географическим и геомагнитным полюсами, значительно большее чем в северном полушарии [1]. Поэтому исследование ионосферы одновременно в обоих магнитосопряженных районах (Антарктический полуостров - Восточное побережье Северной Америки) также представляет интерес, поскольку процессы, происходящие в геосфере, имеют глобальную природу. Станция расположена вблизи области, куда проецируется плазмопауза - часть магнитосферы около границы плазмосферы (L=2,5). Это область с хорошими условиями распространения электромагнитных волн в ОНЧ диапазоне (1-30 кГц). Поэтому на станции традиционно исследовались процессы генерации и распространения волн в условиях плазмопаузы. У границы плазмопаузы находится так называемый среднеширотный провал (трофф) - область, где в ночное время плотность плазмы на высотах слоя F падает до минимума (примерно на порядок). Провал формируется из-за того, что электроны и ионы рекомбинируют быстрее обычного, поскольку температура в этой области выше, и плазма движется из этой области вверх.

Ионосферное зондирование. Ионосферное зондирование проводится с помощью полуавтоматической станции ISP-42, разработанной и изготовленной в Австралии. Зондирование выполняется каждые 15 минут в течение 20-секундного интервала. Ионограммы регистрируются на 16-мм кинопленку и затем обрабатываются на световом столе вручную с введением ежечасовых основных параметров ионосферы в компьютер. Обработка ионограмм производится по стандартной методике URSI. Вычисляются среднемесячные параметры ионосферы foEs, foF2, M3000 F2, которые согласно Меморандуму направляются в БАС. Для особых Геофизических дней составляются F-графики, в которых воспроизводятся основные параметры E и F-слоев ионосферы.

Основные направления исследований, которые позволяет проводить ионосферное зондирование: а) исследование движений нейтральной атмосферы на высотах F-слоя по измерениям hmF2; б) исследование неоднородностей F-области путем анализа деталей F-spread на ионограммах; в) феноменология слоя Es в районе Аргентинских островов; г) исследование движущихся ионосферных возмущений в F-области с использованием в том числе и техники HF допплеровского эксперимента.

Особый интерес представляют исследования нижних слоев ионосферы, поскольку до настоящего времени в основном исследовалась динамика F-области.

На основе ионосферных данных могут развиваться следующие области исследований:

- синоптические исследования эффектов сверхтепловых фотоэлектронов из магнитно-сопряженной области и их влияние на слой F;
- изучение влияния восхода Солнца в зимнее время на динамику F-слоя ионосферы;
- исследование вариаций параметров ионосферы в магнито-спокойные дни, поскольку в такие дни максимум foF2 может изменяться более чем в два раза (эти вариации пока не объяснены);
- исследование влияния эффектов короткопериодических (< 5 мин.) магнитных вариаций на ионосферу, связи магнитных пульсаций с движениями неоднородностей в ионосфере.

Существенные возможности предоставляет переданная БАС украинским ученым программа POLAN для преобразования ионограмм из частотно-высотного представления в реальный электронный профиль. Эта программа проводит коррекцию эффекта запаздывания радиосигнала при прохождении ионосферы. Такая коррекция позволяет переходить от виртуальной высоты на ионограмме к реальному высотному профилю электронной концентрации (рис. 3) [2]. Таким образом, можно получать информацию о высоте максимума концентрации в слое F и о форме профиля, который может использоваться для оценки температуры плазмы.

Эти данные позволяют исследовать эффекты суббури на средних широтах, процессы заполнения и опустошения плазмосферы, распространение в ионосфере акусто-гравитационных и приливных волн (периоды от 30 мин до 2 ч), которые генерируются в авроральных областях во время импульсной суббуревой фазы. Также можно получить данные об изменениях ионосферного профиля в зависимости от высыпаний частиц, вызван-

ных взаимодействием волна-частица в магнитосфере, и проводить исследования изменений в ионосфере во время солнечных затмений. В течение зимовки контролировались вариации средних параметров ионосферы, строились зависимости средних значений foEs, foF2, M3000 F2 для каждого месяца. По полученным данным предполагается проводить подробное исследование ионосферных параметров по направлениям, изложенным выше, в совокупности с записями вариаций магнитного поля.

Рис. 3. *Преобразование записи ионограммы (точки) в высотный профиль электронной концентрации (сплошная кривая) с помощью программы POLAN [2]*

Регистрация ОНЧ-излучения. Исследование радиоизлучения производится с помощью пассивных приемников, которые регистрируют природные радиошумы, создаваемые в ионосфере, магнитосфере и внешнем космосе в диапазоне радиоволн ультранизких (ОНЧ-VLF) частот. Регистрируются также радиоизлучения искусственного происхождения, которые преобразуются при прохождении через геосферу и несут информацию о процессах, происходящих в ней. С этой точки зрения ст. Академик Вернадский имеет большие преимущества, поскольку находится в районе, свободном от производственных шумов, и ее магнитносопряженная область расположена у северо-восточного побережья Северной Америки, сравнительно недалеко от Флориды (США), где наблюдается большая грозовая активность.

Для приема ОНЧ-сигналов используются скрещенные ромбические антенны для регистрации H_x (направление север-юг) и H_y (восток-запад) компонент электромагнитной волны. Антенны расположены на расстоянии 1000 м от базы, что значительно уменьшает шумовой фон. Между антенной и станцией на расстоянии 500 м находится ОНЧ-домик, в котором установлены буферные усилители и согласующие устройства. Вся регистрирующая аппаратура расположена в помещении станции.

Аппаратура приема сигналов в широкополосном диапазоне. Это система для регистрации вистлеров, шумов, хоров, распространяющихся по ионосферным "волноводам" - дактам (выделенным замкнутым трубкам магнитного поля) в диапазоне частот 1÷25 кГц. Природа вистлеров - молниевые разряды, которые излучают ЭМ сигнал в широком диапазоне спектра.

Часть излучения молнии в ОНЧ-диапазоне (атмосферики) легко распространяется между поверхностью Земли и нижней ионосферой в так называемом субионосферном волноводе. Когда эффективность отражения от ионосферы высока, это излучение может переотражаться от границ волновода, пока не окажется ниже уровня шума. Поэтому неоднородности принимаемого сигнала состоят в этом случае из серии импульсов, которые производят слабый музыкальный звук. Этот тип атмосфериков называется твик (tweek).

Около 1 % излучения молнии попадает в ионосферу и распространяется вдоль магнитных силовых линий. Сигналы различной частоты распространяются с разной скоростью - существует дисперсия скорости от частоты. Сигналы более высокой частоты распространяются быстрее, чем низкой, в результате в точке наблюдения вблизи конца магнитной трубки регистрируется сигнал с уменьшающейся во времени частотой (похож на свист) - это и есть вистлер (рис. 4). Часть излучения отражается и распространяется в обратную сторону, а потом возвращается в эту же точку, таким образом, наблюдаются многократные прохождения вистлеров, рожденных одним грозовым разрядом [2]. Поскольку дисперсия связана с концентрацией электронов, то естественно использовать вистлеры для исследования вариаций электронной плотности в ионосфере и магнитосфере. На рис. 4 из [2] показан путь волны вистлера, генерированного молнией, случай, когда вистлер претерпевает четыре отражения прежде чем теряет энергию вследствие затухания Ландау. Амплитуда волны вистлера падает примерно на 7 порядков величины в течение 9 с. Волна отражается, когда угол между волновым вектором и магнитным полем равен 90 град. Вблизи этих точек резонансная энергия становится очень большой, следовательно, наблюдается очень слабое поглощение (плато на графике амплитуды). Значительное поглощение имеет место только при первом отражении, когда резонансная энергия мала и угол близок к 90 град.

Вистлеры регистрируются чаще ночью, чем днем, что связано с относительно сильным поглощением в дневной ионосфере. Они чаще регистри-

руются в областях, где магнитосопряженный район является активным грозовым районом.

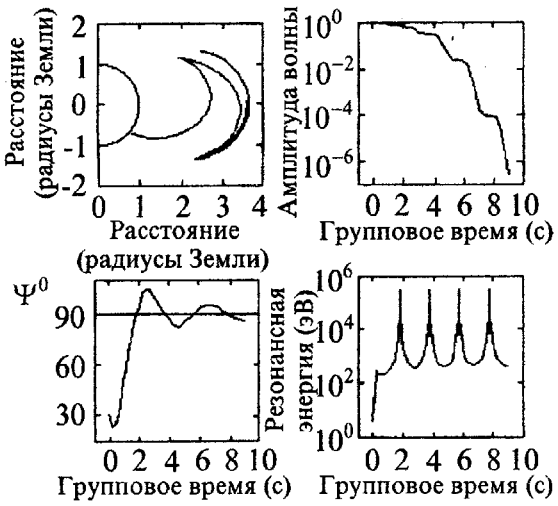

Рис. 4. *Путь волны вистлера, рожденного молниевым разрядом в северном полушарии, и графики изменения амплитуды волны, фазы и энергии (из работы [2])*

Область максимальной частоты регистрации вистлеров лежит вблизи 50 градусов геомагнитной широты. Обычно один и тот же вистлер регистрируется в области диаметром около 1000 км. Путь распространения вистлера зависит от частоты, распространение происходит по тем дактам, гирочастота электронов на которых близка к частоте вистлера. Волна вистлера взаимодействует с электронами плазмосферы, получает от них энергию и распространяется вдоль дакта.

Иногда регистрируется другой тип ОНЧ излучения - "хоры" и сигналы возрастающего тона (risers). Они появляются на более высоких широтах, чем вистлеры, и больше зависят от геомагнитной активности, коррелируют с авроральными явлениями.

На станции компоненты H_x и H_y совместно с метками времени регистрируются при помощи стереомагнитофона. Сигнал проходит через гониометр с подмешиванием sin/cos опорного сигнала для вращения плоскости поляризации антенны. С помощью частотного преобразователя сигнал в диапазоне 15-25 кГц преобразуется в сигнал 2-12 кГц для возможности записи на звуковой магнитофон. В периоды повышенной ионосферной активности, что определяется прослушиванием ионосферы через громкоговоритель, может проводиться непрерывная запись сигналов. Для просмотра сигналов на станции имеется 18-канальный спектроанализатор. Информация хранится на магнитной (магнитофонной) ленте. Скорость записи 9,5 см/с. Наилучшим временем для наблюдений являются ночные часы и зимний период на станции. Это обусловлено отсутствием слоя D, поглощающего ОНЧ сигналы.

Поскольку специальной программы ОНЧ-измерений на зимовку 1996 года не подготавливалось, наблюдения проводились эпизодически в середине зимы и во время магнитных бурь. Полученные данные предполагается анализировать совместно с данными по магнитному полю и ионосферному зондированию.

Прием радиосигналов Омега и MSK передатчиков. Аппаратура для приема радиосигналов Омега и MSK передатчиков используется для регистрации и исследования явлений "тримпи" [3]. Это события, связанные с резким увеличением концентрации плазмы в основании дакта, по которому распространяется вистлер, из-за высыпания высокоэнергетичных электронов.

Физика этого явления такова - во время распространения вистлера вдоль дакта происходит обмен энергией между вистлером и высокоэнергетичными электронами из внутреннего радиационного пояса. Электроны отдают энергию вистлеру, особенно эффективно этот обмен происходит вблизи гирочастоты вращения электрона вокруг силовой линии магнитного поля. В зависимости от частоты ЭМ волны вистлера они распространяются по соответствующей L-оболочке. Чем ниже частота ЭМ волны вистлера, тем более высокие оболочки можно с ее помощью исследовать и, наоборот, высокая частота излучения позволяет исследовать оболочки с малым L. Электроны, потеряв энергию, переходят на более низкие оболочки и могут проникнуть глубоко в основание ионосферы на высоты 90-70 км. В результате появляются пятна с повышенной концентрацией электронов в плотной ионосфере. Время появления такого пятна - 1÷3 с, время рассасывания - 30÷40 с из-за большой плотности ионосферы и, как следствие, большой скорости рекомбинации.

В результате сигналы постоянно работающих передатчиков, принимаемые на станции аппаратурой OMSK, резко изменяют амплитуду и фазу из-за резкого изменения концентрации электронов (и, как следствие, увеличения поглощения) в области D и ниже, а затем медленно восстанавливаются с теми же характерными временами (рис. 5). Омега-передатчики излучают непрерывный сигнал со скачкообразным изменением частоты во времени (форма изменений похожа на символ "омега"). Передатчики MSK (Multiple Shift Keying) излучают сигнал, полученный в результате смешения двух близких частот 15975 и 20025 Гц, которые передаются в разные периоды времени, изменяющиеся через каждые 40 мс. Передатчики расположены в Северной Америке, Новой Зеландии, Аргентине. Регистрация производится с помощью специального OMSK-приемника с записью и отображением сигналов на PC XT

(управление регистрацией, запись информации в файл, просмотр данных).

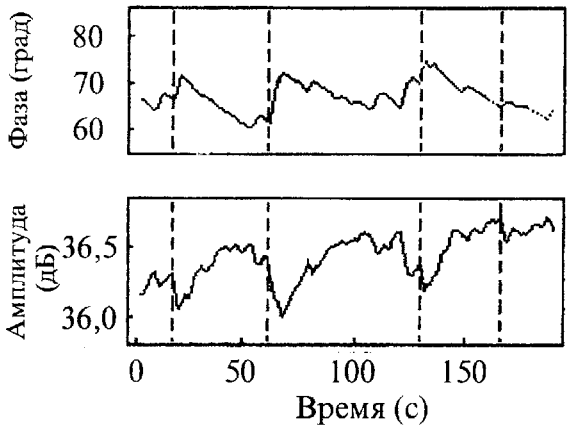

Рис. 5. *Пример регистрации амплитуды и фазы ОНЧ-сигнала аппаратурой OMSK. Штриховыми линиями отмечены явления "тримпи" [2,3]*

Интересное направление в области ОНЧ наблюдений на станции Фарадей связано с исследованием высыпаний электронов, вызванных молниевыми разрядами. Основой являются данные регистрации событий "тримпи" - искажений распространяющихся ОНЧ-сигналов из северного полушария, регистрировавшихся одновременно на станции Фарадей и Палмер (США). Несмотря на малое расстояние между станциями (60 км), были обнаружены различия в сигналах [4]. Были определены высотные профили высыпающихся электронов и высотные профили электронной плотности в ионосфере на пути распространения сигнала, при этом использовалась 3-D модель распространения ОНЧ сигналов в ионосфере. Результаты показывают, что наблюдаемые ОНЧ-события рождаются в относительно плотной ионосфере в ночном слое D и приводят к высыпаниям электронов с энергией более 600 кэВ.

Наблюдение явлений "тримпи" на нескольких станциях (включая Академик Вернадский) одновременно с регистрацией ОНЧ-сигналов на широкополосных приемниках позволяет определить протяженность и положение области высыпания электронов в нижней ионосфере (в слое D).

Регистрация допплеровского смещения ОНЧ-сигналов. Эти измерения проводились сотрудниками БАС до передачи станции Украине, затем аппаратура для регистрации допплеровского смещения ОНЧ сигналов была вывезена со станции. Однако будет полезным привести здесь описание аппаратуры и эксперимента, тем более, что в перспективе по этой тематике можно будет проводить совместные исследования с БАС.

Для регистрации и комплексного анализа ОНЧ-сигналов (амплитуда, фаза, частота, допплеровский сдвиг при прохождении дактов с различной плотностью плазмы) применялся "допплеровский приемник". Регистрировались сигналы NAA и NSS (24 и 21,4 кГц) от передатчиков расположенных в Северной Америке. Передатчики имеют стабильность частоты не хуже 1×10^{-9} и применяют код сдвига частоты MSK. Если в случае регистрации вистлеров есть трудности с определением, какому молниевому разряду принадлежит данный вистлер, то в случае приема сигнала от передатчика точно известны исходные параметры сигнала и координаты источника. При приеме сигнала от двух передатчиков определяется запаздывание сигнала, распространяющегося по дакту, по отношению к сигналу, распространяющемуся по субионосферному волноводу.

Преимущества этого метода заключаются в точном определении места излучения и частоты сигнала. Благодаря этому можно исследовать допплеровский сдвиг частот сигнала и тем самым изучить движение силовых трубок, по которым распространяется сигнал. Недостаток метода - отсутствие сигналов низких частот. Невозможно исследовать L оболочки с значениями больше 2,6. Реально диапазон значений L, исследуемых этим методом, лежит в пределах 1,6÷2,6. Это зависит от частоты излучения передатчиков. Были сообщения, что наблюдалось прохождение вистлер-моды в пределах оболочки L=1,2 (Япония - Гавайи), но, вероятнее всего, это было прохождение по неоднородностям нижней ионосферы.

Данный метод применяется для исследования плазмосферы и плазмопаузы. Запись, отображение и статистическая обработка сигналов производились с помощью PC "Apple-Macintosh". Исследовались вариации допплеровского сдвига во время восхода и захода Солнца, магнитных бурь. По данным можно судить о конфигурации магнитного поля, концентрации плазмы, протяженности и динамике дакта [5]. Типичное наблюдаемое групповое запаздывание составляет 0,2÷0,9 с, допплеровский сдвиг изменяется в пределах от –0,5 Гц до +0,5 Гц. Обычно регистрируемый поперечный плазменный дрейф, вызванный электрическим полем, находится в пределах 0,2 - 0,3 мВ/м. Фиксируется также и изменение направления E-поля, которое соответствует минимуму группового запаздывания. Разработаны также методы математической обработки сигналов для выявления тонкой и сверхтонкой структуры вистлеров (расщепление дактов).

Один из последних экспериментов - исследование сигналов вистлер-моды одновременно на станциях Фарадей и Дьюнедин (Новая Зеландия), расположенных на расстоянии 7500 км [6]. Было зарегистрировано 15 одновременных событий вистлеров, полученных от передатчиков, расположенных в Северной Америке. Различие в групповом запаздывании вистлер-моды, измеренное на разных станциях, позволяет определить положе-

ние дакта, по которому распространяются вистлеры, и оценить мощность излучения, используя модели субионосферного распространения электромагнитного излучения. Интерес представляет оценка потерь энергии при распространении вистлера в плазмосфере для определения возможного механизма волна-частица и способа передачи энергии от частиц вистлеру.

Магнитные измерения. Основной задачей магнитных наблюдений является исследование структуры и динамики геомагнитного поля в высоких широтах Южного полушария. Ряд наблюдений на станции Академик Вернадский (Фарадей) является одним из самых длинных на Антарктическом континенте - наблюдения проводятся с 1957 г. [7]. Эти данные являются основой для исследования переменного магнитного поля, создаваемого внешними источниками, его связей с физическими явлениями в ионосфере и магнитосфере. Непрерывная запись D, H и Z компонент магнитного поля, как в аналоговой форме, так и в цифровой, позволяет исследовать широкий спектр геомагнитных возмущений. Особую ценность представляет возможность параллельного контроля за состоянием ионосферы с помощью ионосферного зондирования, что позволяет работать над обширным фактическим материалом с целью установления связей этих параметров с климатическими изменениями.

Данные о вариациях геомагнитного поля на станции регистрируются с точностью 1 нТл с помощью La Cour вариометров H, Z и D компонент магнитного поля, расположенных в немагнитном доме. В этом же доме расположены два идентичных феррозондовых магнитометра (Fluxgate magnetometer). Данные одного из них выводятся на самописец, расположенный в помещении базы, для оперативного контроля геомагнитной обстановки, данные другого регистрируются с помощью ЭВМ на магнитный диск и выводятся на принтер. Точность измерений вариаций магнитного поля с помощью этих приборов также составляет 1 нТл, частота опроса - 20 с.

По данным вариометров с помощью палеток определялись 3-часовые K-индексы для H и Z компонент магнитного поля. K-индексы можно также найти с помощью феррозондового магнитометра, используя специальную программу обработки данных. Калибровка данных вариометров проводилась с помощью колец Гельмгольца, по которым пропускался стандартный ток (создавалось калиброванное магнитное поле вокруг вариометров).

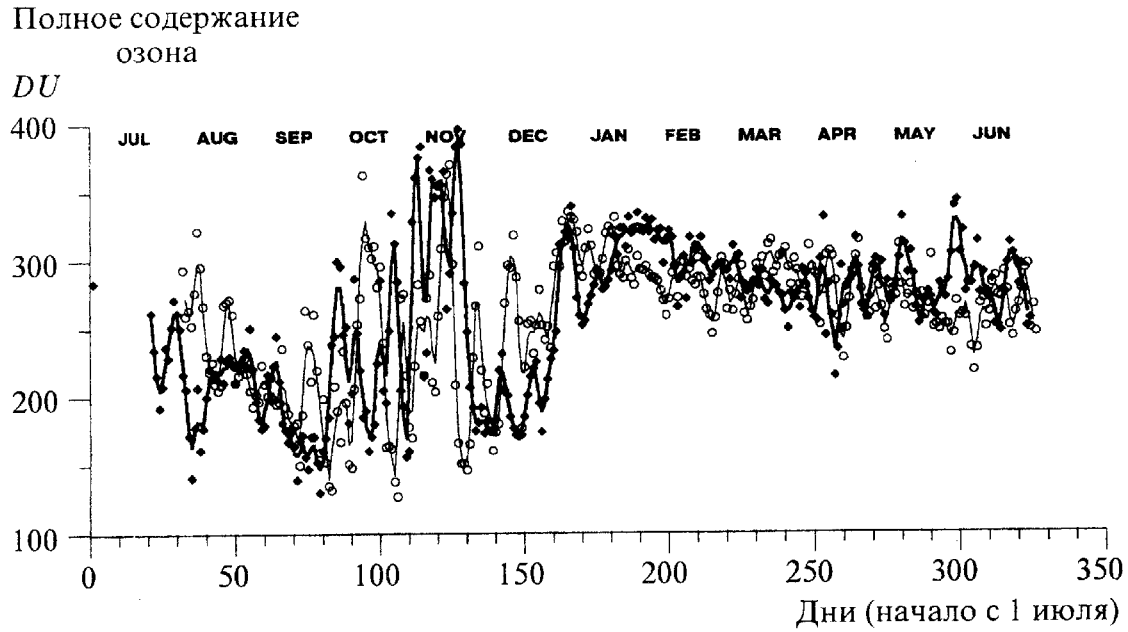

Рис. 6. *Изменения полного содержания озона над станцией Академик Вернадский (Фарадей) за два сезона 1995/96 (кружки, тонкая линия) и 1996/97 (ромбы, жирная линия). Период озоновой "дыры" приходится на сентябрь-декабрь, но и в апреле отмечаются дни с малым содержанием озона (200 ед. Добсона)*

Кроме измерения вариаций, еженедельно проводились абсолютные магнитные измерения с помощью феррозондового магнитометра, укрепленного на трубе теодолита. Измерялись H и D компоненты, а Z-компонента вычислялась по данным измерений полного магнитного поля F, получаемым с помощью протонного магнитометра. Точность определения параметров магнитной линии 1 нТл. Эти данные используются для исследования вековых вариаций геомагнитного поля.

Данные магнитных измерений представлялись ежемесячно в виде таблиц 3-часовых K-индексов,

которые направлялись в БАС и в Париж (ISGI) для определения планетарных геомагнитных индексов.

3.2. Исследования озонового слоя

Основными задачами измерений общего содержания озона в атмосфере на станции являются: а) выявление закономерностей изменений озонового слоя над Антарктикой и их влияние на глобальные изменения окружающей среды и климата; б) изучение полярных стратосферных и аэрозольных облаков с целью исследования механизма истощения озонового слоя и динамики малых составляющих атмосферы. Особую ценность представляют длинные ряды наблюдений, позволяющие осуществлять контроль в масштабе последних десятилетий. Станция Академик Вернадский географически расположена в области "озоновой дыры". Озоновые измерения проводятся здесь с 1957 г., что является одним из наиболее долговременных рядов наблюдений в Антарктике. Содержание озона определяется с помощью спектрофотометра Добсона с точностью до 1%, что дает возможность уверенно выделять долговременные тренды с перспективой прогнозов на будущее. Самые последние данные, полученные нами на станции, показывают, что процессы образования озоновой дыры над Антарктикой прогрессируют - содержание озона антарктическим летом 1995/96 оказалось самым низким за всю историю наблюдений (рис. 6) [8,9].

Данные озоновых наблюдений направлялись в БАС еженедельно в соответствии с Меморандумом. Сотрудники БАС отметили высокое качество измерений, выполненных украинскими специалистами.

3.3. Метеорологические и гляциологические исследования

В течение зимовки на ст. Вернадский проводились синоптические метеонаблюдения, наблюдения за уровнем моря, регистрация осадков и снегомерные съемки.

Полные синоптические измерения производились в трехчасовых интервалах по стандартной программе ВМО. В нее входит определение высоты, количества и типа облачности, прозрачности атмосферы, дальности видимости по известным реперам (горам) и др. Основные метеоизмерения проводились с помощью автоматической аппаратуры MAWS. Данные с MAWS автоматически записываются в файл. Каждые 6 часов оперативные данные с MAWS и синоптические измерения передавались по HF связи на станцию БАС Розера. В месте расположения станции непрерывные метеонаблюдения проводятся с 1947 года. Это придает им особую ценность, тем более что в последние годы в районе Антарктического полуострова регистрируется постоянное повышение среднегодовой температуры.

Программа регистрации и отбора проб осадков проводится по заказу МАГАТЭ (Вена) с целью контроля загрязнения окружающей среды. Осадки разливаются в специальные контейнеры и ежегодно отправляются в МАГАТЭ.

Данные с автоматического датчика приливов "Tide Logger" Прудмановской лаборатории ежегодно забираются сотрудником лаборатории. Все измерения уровня моря производятся в футах (30,48 см). Данные с лент автоматической записи считывались ежедневно и вводились в ЭВМ.

По программе гляциологических исследований на ледяном куполе холма Вузл (о. Галиндез) был установлен снегомерный полигон и метеорологическая будка для исследования микроклимата купола. По данным еженедельных наблюдений было исследовано сезонное снегонакопление на куполе. К сожалению, теодолитных съемок высоты купола для определения массобаланса ледника как целого проведено не было.

В качестве гляциологических объектов значительно больший интерес представляют выводные ледники Земли Грейама. Однако для их исследования необходимо, чтобы по крайней мере два человека длительное время работали в полевых условиях. К сожалению, ледовая обстановка в зимний период не позволила организовать полевой лагерь.

4. Предложения по проведению геофизических исследований

Исходя из необходимости формирования научной концепции и программы антарктических исследований Украины, к работам, которые целесообразно продолжать и развивать на станции Академик Вернадский, несомненно, относятся геофизические исследования (не исключая других направлений) по научным программам, выполнявшимся ранее Великобританией, тем более, что согласно Меморандуму Украина должна предоставлять в БАС и мировые центры данных результаты метео- и геофизических измерений. Целью этих исследований является изучение современных процессов глобальных изменений, например, изменения в озоновом слое и "парниковый" эффект, проведение реконструкции истории климата Антарктики для лучшего понимания механизмов влияния и взаимодействия системы лед-океан-атмосфера-ионосфера-Солнце.

Сейчас измерения на станции проводятся в рамках научных направлений, которые являются составными частями крупной международной программы International Geosphere/Biosphere Programme (IGBP). Ее задачи: а) регистрация и предсказание глобальных изменений, б) наблюдение доминирующих процессов, в) изучения явлений-индикаторов глобальных изменений,

г) оценка эффектов глобальных изменений, которые могут стать причиной крупномасштабной и существенной модификации среды, что повлияет на доступность возобновляемых и невозобновляемых ресурсов.

Основная цель IGBP - разработка моделей, предсказывающих возможные глобальные изменения окружающей среды на Земле. Антарктида в программе IGBP играет ключевую роль, поскольку все эффекты глобальных изменений на Земле (климат, окружающая среда, и др.) здесь проявляются заметнее, чем в средних широтах и поэтому лучше контролируются. Кроме того, Антарктида является хранилищем палеоданных об окружающей среде, содержащихся в ледниках и морских отложениях. Часть программы IGBP, касающейся Антарктики, выполняется под эгидой SCAR.

В настоящее время измерения на станции можно условно подразделить на две части: (1) мониторинг климата (метеорология, приливы), (2) мониторинг верхней атмосферы (измерения озонового слоя, запись вариаций магнитного поля, ионосферное зондирование, регистрация ионосферных ОНЧ-сигналов).

Исходя из технической оснащенности и наличия долговременных рядов наблюдений, на станции целесообразно развивать работы по исследованию процессов взаимовлияния метео-, сейсмо- и техногенных явлений в тропосфере и нижней атмосфере на ионосферу Земли через систему "тропосфера-стратосфера-мезосфера", по выявлению роли этих процессов в формировании и долгосрочных изменениях окружающей среды. Эти работы естественно проводить по четырем направлениям:

- регулярные геофизические наблюдения для продолжения рядов метео-, ионосферных и атмосферных параметров;
- обработка и интерпретация имеющихся ионосферных, магнитосферных и атмосферных данных, их ретроспективный анализ;
- разработка и оснащение станции Академик Вернадский новой современной аппаратурой;
- интегрирование исследований, проводимых на станции, в различные проекты, выполняемые на Украине, например, в космические.

Эти направления являются ключевыми в разработанном проекте "Атмосфера", включающем кооперацию ведущих украинских институтов в этой области. В рамках проекта, в частности, планируется оснащение станции современными высокочувствительными магнитометрами, переоборудование аналогового ионозонда для цифровой регистрации ионограмм, разработка мезосферного радиолокатора и Фурье-спектрометра, модификация существующей аппаратуры для расширения ее возможностей. Вся аппаратура будет объединена унифицированной системой сбора, обработки, архивирования и визуализации данных. Это позволит проводить на современном уровне исследования процессов взаимодействия в системе "солнечный ветер - магнитосфера - ионосфера - мезосфера - стратосфера - тропосфера" и механизмов передачи, распространения и диссипации энергии в ней, что является ключевым вопросом в проблеме глобальных изменений окружающей среды и климата.

Среди отдельных направлений развития исследований на станции Академик Вернадский следует отметить: а) изучение влияния мощных линий электропередач, молний и ОНЧ передатчиков на окружающую среду (ионосферу) с целью индентификации и количественного описания сопровождающих эти явления процессов, воздействие этих явлений на окружающую среду в глобальном масштабе; б) определение ионосферных эффектов над станцией, вызванных техногенным воздействием и возмущениями в магнитно-сопряженном районе - восточном побережьи США (старты космических аппаратов, инжекция плазмы в ионосфере, нагрев ионосферы, грозовая активность); в) поиск проявлений ионосферных возмущений в вариациях атмосферных эмиссий и исследование среднеширотных стабильных авроральных красных дуг.

Последнее направление представляет интерес, поскольку природа стабильных авроральных красных дуг до сих пор не изучена [10]. Авроральные красные дуги представляют собой области повышенной интенсивности эмиссии (630 нм), наблюдаемые в средних широтах во время и после магнитных бурь. Их свойства были определены в 70-х годах, а в 80-х сделаны попытки объяснить их природу. Сейчас очевидно, что "горячий" электронный газ в ионосфере важен для появления дуг, но точные механизмы до сих пор обсуждаются. Остается много вопросов: когда и где они появляются, как они связаны со среднеширотным провалом и плазмопаузой, появляются ли они только внутри плазмопаузы, на каких высотах эти эмиссии имеют место, характеризуются ли дуги изменениями с солнечным циклом, или зависят только от изменений кольцевого тока.

Станция Академик Вернадский - хорошее место для исследований стабильных авроральных красных дуг. Она находится немного севернее района максимального их появления (L=3). Продолжительный период темноты зимой позволяет проводить длительные их наблюдения. Кроме того, среднеширотный провал, главным образом, - ночное явление, и поэтому связь дуг с провалом можно исследовать в течение длительного времени. Если проводить совместно с оптическими наблюдениями и регистрацию ОНЧ излучения широкополосным приемником, и ионосферное зондирование, то можно определить положение плазмопаузы по отношению к дуге. Это важная

информация для определения процессов образования дуг.

И еще одно направление работ - медико-биологические исследования влияния геомагнитных и ионосферных возмущений, а также флуктуаций магнитного поля, вызванных авроральными процессами, на здоровье и практическую деятельность человека. Такое исследование имеет геофизические и экологические аспекты и обусловлено влиянием солнечной активности, геомагнитных возмущений, отдельных магнитных бурь, низкочастотных геомагнитных пульсаций на возникновение и обострение различных болезней. Для этих работ станция является хорошо оснащенной лабораторией, позволяющей получать весь необходимый комплекс геофизических параметров.

Заключение

Научная программа исследований во время первой зимовки на антарктической станции Академик Вернадский была выполнена полностью. Продолжены непрерывные ряды наблюдений по физике ионосферы, магнитосферы, метеорологии, озону, приливам. Получены новые данные о динамике озонового слоя. Проведены геологическая рекогносцировка района станции, астрономические наблюдения по регистрации кометы Хайкутаке и снегомерные наблюдения на ледовом куполе Вузл. По результатам исследований получены данные в области физики верхней атмосферы, климата и эволюции озонового слоя, которые передавались в мировые центры данных. Все аварийные ситуации, возникшие за время зимовки, были ликвидированы профессионально и в короткие сроки, в результате не было ни одного дня, когда аварийные ситуации дезорганизовали работу станции и привели к потере научных данных. Сделан первый шаг, в результате которого украинские ученые получили в руки инструмент для исследований в районе, определяющем будущее развитие науки.

Автор благодарен профессору Радиоастрономического института НАН Украины (г. Харьков) Юрию Ямпольскому за полезное обсуждение и рекомендации по подготовке данной статьи.

Литература

1. A.S. Rodger, A.J. Smith. Phil. Trans. R.Soc. Lond. **A 328**, 1989, pp. 271-287.
2. British Antarctic Survey, Annual Report 1993-94. The Natural Environment Research Council, Cambridge, BAS, 1994, 124 p.
3. A.J. Smith, P.D. Cotton, J.S. Robertson. AGARD conference Proceedings, Neully sur Seine. France, AGARD, 1993, 8.1-8.7. p. 529.
4. S.J. Lev-Tov, U.S. Inan, A.J. Smith, M.A. Clilverd. AGU 1995 Fall Meeting. San Francisco, Cal., p. F105.
5. M.A. Clilverd, A.J. Smith, N.R. Thomson. Planet. Space Sci. 1991, **39**, No. 7, pp. 1059-1067.
6. M.A. Clilverd, N.R. Thomson, A.J. Smith. Journ. Atm. Terr. Phys. 1993, **55**, No. 10, pp. 1469-1477.
7. P.A. Salino. Geomagnetic measurements at Argentine Islands 1957-82. British Antarctic Survey, 1985, 76 p.
8. A.E. Jones, J.D. Shanklin. Nature. 1995, **376**, pp. 409-411.
9. G.P. Milinevsky. Proceedings of 24 Annual Meeting of Atmospheric Studies by Optical Methods, Kiev, August 1996. SPIE of the Intern. Society for Optical Engineering, 1997.
10. J.U. Kozyra, A.F. Nagy. Reviews of Geophysics. 1997, **35**, No. 2, pp. 155-190.

Scientific Researches at Ukrainian Antarctic Station Vernadsky

G. P. Milinevsky

The events of the process of handover British Antarctic Station Faraday to the Ukraine and of the First Ukrainian Wintering 1996/97 are given. The research possibilities in the field of Upper Atmosphere are discussed. British Antarctic Service transferred to the Ukrainian Antarctic Center the equipment for Upper Atmosphere and other investigations in order to continue the data rows started from 1957. For investigation of a geospace there are the ionosonde equipment, the magnetometers, the broadband VLF-receiver, and the equipment for Trimpi-effect studying. From the end of November 1995 the observations with the ionosonde, the magnetometers, broadband VLF-receiver, ozone, and meteo observations at Faraday station were started to be carried out by Ukrainian scientists. This process has finished at 6 February 1996 when the handover process to Ukraine has been finished and the station was renamed Vernadsky. The ozone ground-based observations were made using Dobson spectrophotometer that was handed over to the Ukraine by the BAS in order to continue the one of the longest series of total ozone data in Antarctica. In 1995/96 season the features of the ozone "hole" appeared in the middle of September. The data of last two seasons shows that ozone hole above Antarctica has extended in time to summer months and has appeared earlier in the polar spring.