Вестник
Отделения наук о Земле
Российской академии наук

Вестник ОНЗ РАН, т. 13, NZ2001
https://doi.org/10.2205/2021NZ000371
© Геофизический центр РАН 2021 г.
CC BY

МГД волны в космосе и на Земле: Исторический аспект

В. А. Пилипенко*,[1,2]

[1] *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*
[2] *Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия*

Получено 12 июня 2021; принято 1 сентября 2021; опубликовано 10 ноября 2021.

Дан краткий и популярный обзор истории исследований в институтах АН СССР волновых вариаций геомагнитного поля в низкочастотной части ультра-низкочастотного (УНЧ) диапазона от долей до десятков мГц. Шумы и колебания УНЧ диапазона отражают турбулентный характер взаимодействия плазмы солнечного ветра с земной магнитосферой. Физика УНЧ волн опирается на теоретический аппарат физики плазмы и магнитной гидродинамики, а экспериментальной базой исследований являются данные наблюдений на спутниках и наземных станциях. Рассказано о некоторых значительных экспериментах в СССР по изучению различных типов УНЧ волн и излучений, и о пионерских результатах советских геофизиков, получивших международное признание. Особое внимание уделено ученым, не имеющим широкой известности, которым почти не уделялось внимания в исторической литературе. Выяснение физической природы УНЧ волн и построение адекватных математических моделей привело к созданию «гидромагнитной сейсмологии» околоземного пространства, позволяющей восстанавливать плотность плазмы в магнитосфере и ионосфере по наземным наблюдениям. Кроме того, УНЧ диапазон оказался наиболее перспективным для поиска электромагнитных шумов литосферного происхождения, связанных с процессами подготовки землетрясений.

Ключевые слова: история геофизики, наука в СССР, УНЧ волны, геомагнитное поле, электродинамика литосферы.

1 Введение

Околоземное пространство отнюдь не является космической пустотой, изредка пронизываемым космическими лучами, а оказывается сложной и динамичной плазменной системой. Как схематично показано на рис. 1, в ней протекают мощные токи, движутся интенсивные потоки ионизированных частиц разных энергий (от тепловых до ультра-релятивистских), и которая заполнена электромагнитными полями разных пространственных и временных масштабов (от глобальных до кинетических). Магнитогидродинамические (МГД) волны, заполняющие все околоземное космическое пространство, доносят до земной поверхности информацию о свойствах окружающей Землю плазмы. Эти волны с периодами от 10 мин до первых десятков сек регистрируются спутниковыми и наземными магнитометрами в виде пульсаций геомагнитного поля [*Гульельми и Потапов*, 2017; *Пилипенко*, 2002; 2003]. Весь диапазон УНЧ (ULF, ultra-low-frequency) волн охватывает более 3 порядков по частоте – от долей мГц до нескольких Гц. Границы диапазона условны, качественно можно полагать, что снизу он ограничен фундаментальной частотой МГД колебаний всей магнитосферы, а сверху – частотой Шумановского резонанса (~ 8 Гц) – сферического резонатора для электромагнитных волн, образуемого поверхностью Земли и нижней кромкой ионосферы (~ 100 км). На рис. 2 показан пример глобальных пульсаций геомагнитного поля на сети наземных магнитных станций, которые являются наземным проявлением МГД волн в магнитосфере Земли. Энергетически МГД волны являются самым мощным природным волновым электромагнитным процессом в околоземном пространстве, как видно из сравнения спектральной плотности различных типов природных излучений на рис. 3.

Вот уже более ста лет геомагнитные пульсации привлекают внимание исследователей красотой форм, сложным и загадочным поведением. Они дают пример резонансного взаимодействия

*Контакт: pilipenko_va@mail.ru

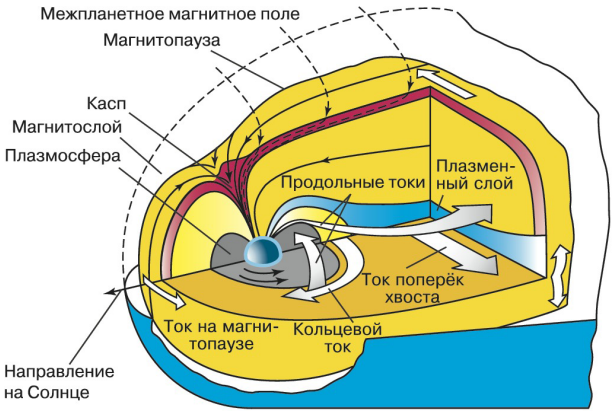

Рис. 1: Основные элементы структуры и токовые системы магнитосферы Земли

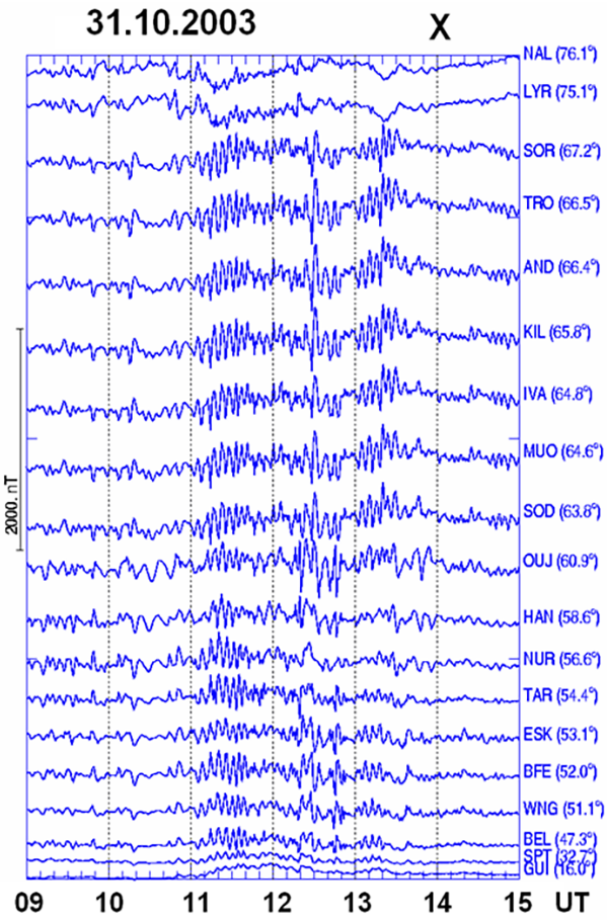

Рис. 2: Пример глобальных Pc5 пульсаций (X-компонета), зарегистрированных на широтном профиле наземных магнитных станций на фазе восстановления магнитной бури 31 октября 2003 г.

волн и частиц в плазме, доставляют информацию об удаленных областях околоземного пространства, и даже влияют на ход магнитосферных процессов. Околоземная плазмы начиная с удаления от Земли более ~ 500 км становится бесстолкновительной, и передача энергии и импульса в такой среде становится возможной только благодаря взаимодействию волн и частиц. В УНЧ волнах заключен целый мир разнообразных свойств и сами они являются существенной частью доступного нам мира [*Гульельми*, 2019].

В данной заметке будут рассмотрены исторические аспекты эволюции научных представлений о волновых вариациях геомагнитного поля и их исследований в институтах АН СССР. Основное внимание уделяется тем исследователям и экспериментам, которые были недостаточно освещены в истории науки.

2 Открытие электромагнитных УНЧ волн

Принято считать, что впервые геомагнитные пульсации были обнаружены Стюардом, в 1859 г. в обсерватории под Лондоном. Хотя периодические колебания с небольшими амплитудами в магнитном поле были замечены в 1841 г. в обсерватории Упсала, и в 1840 г. в обсерватории под Хельсинки. В то время никто еще не догадывался, что геомагнитные УНЧ пульсации были, по существу, первыми электромагнитными волнами, зарегистрированными человечеством.

Действительно, только в 1888 г. Г. Герц создал устройство, которое улавливало сигнал, возникавший при проскакивании искры в разрыве электрической цепи. Тем самым он подтвердил предположение Д. Максвелла о том, что свет – это разновидность электромагнитного излучения, и экспериментально показал, что этот сигнал является электромагнитной волной и распространяется со скоростью света. Сам термин «радио» впервые ввёл в обращение У. Крукс примерно за 20 лет до первых практических опытов по беспроводной телеграфной связи. Создателем первой успешной системы беспроводной передачи телеграфного сигнала считается Г. Маркони, который в 1895–1896 гг. осуществил первую передачу радиосигнала через Атлантику. Независимо от него, свой прибор для приема электромагнитного сигнала от удаленного передатчика А. С. Попов продемонстрировал на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге в 1895 г.

Возможность физической интерпретации низкочастотной части УНЧ волн возникла благодаря созданию магнитной гидродинамики Х. Альвеном, и отмеченным за ее открытие Нобелевской премией в 1970 г. МГД волны можно качественно представлять, как колебания проводящей жидкости, в которой движения частиц плазмы тесно «склеено» с возмущениями магнитного поля. Также МГД волны можно считать электромагнитны-

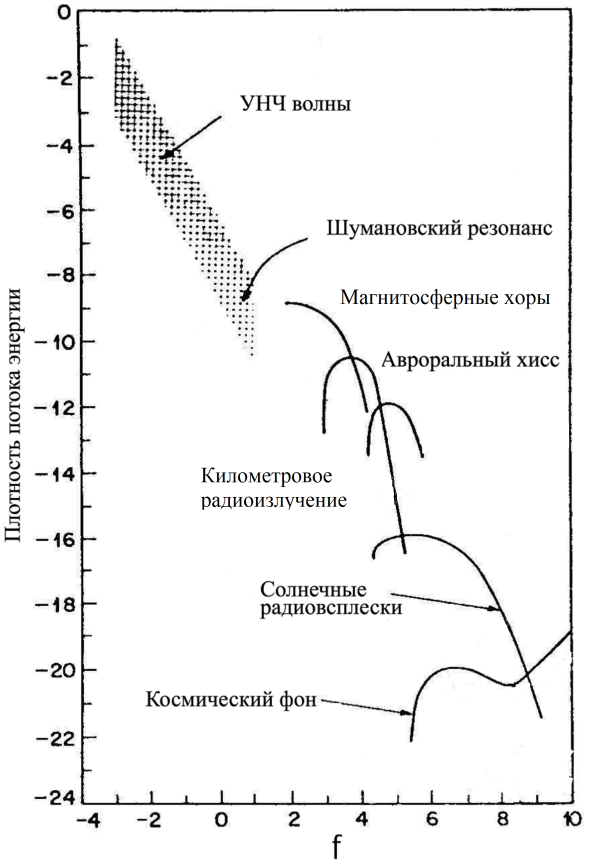

Рис. 3: Спектральная плотность потока энергии (Вт/м^{2}Гц) различных типов природных излучений в околоземном пространстве (в двойном логарифмическом масштабе)

ми волнами в среде с громадной диэлектрической проницаемостью. Бесстолкновительная околоземная плазма и является такой средой, которая замедляет низкочастотные электромагнитные волны до скоростей $\sim 10^3$ км/с – типичных значений альвеновской скорости в магнитосфере Земли.

В 1954 г., т.е. почти через 100 лет после открытия УНЧ пульсаций, Д. Данжи предположил, что эти пульсации в околоземной плазме являются стоячими альвеновскими волнами в резонаторе, образуемым силовыми линиями и ограниченным сопряженными проводящими ионосферами. В целом магнитосфера подобна гигантскому мазеру для МГД волн, в который накачиваются шумы солнечного ветра, которые затем фильтруются по частоте в магнитосферном резонаторе, и высвечиваются к земной поверхности через полупрозрачные зеркала (ионосферы) (рис. 4). Неравновесные распределения энергичных частиц в магнитосфере, подобно инверсной заселенности атомной структуры, также могут возбуждать УНЧ колебания в магнитосферном мазере. К настоящему времени написано несколько монографий, посвященных физике МГД волн в околоземной плазме [*Гульельми и Троицкая*, 1973; *Леонович и Мазур*, 2016; *Пудовкин и др.*, 1976; *Menk и Waters*, 2013; *Walker*, 2004].

УНЧ волны классифицируются по спектральным особенностям – как узкополосные (Pc) или широкополосные (Pi), и частотному диапазону. МГД волны соответствуют диапазону Pc5 (периоды $T \sim 2$–10 мин), Pc4 и Pi2 ($T \sim 40$–150 сек), и Pc3 ($T \sim 10$–45 сек). Выделение характерных частот в спектре УНЧ возмущений в околоземной среде обусловлено резонансными свойствами магнитосферного резонатора, собственная частота и вторая гармоника которого на авроральных широтах соответствуют Pc5 и Pc4 диапазону. Pc3 диапазон соответствует частоте циклотронного резонанса в области форшока.

Исследование плазменных и волновых явлений в околоземном пространстве опирается на теоретические подходы, разработанные в физике плазмы и магнитной гидродинамики. Однако нельзя сказать, что космическая геофизика занимается только приложением физических представлений, выработанных в общей физике плазмы. Ряд принципиально новых идей, получивших затем широкое развитие, взят физиками из космической геофизики: пересоединение силовых линий и аннигиляция магнитных полей, бесстолкновительные ударные волны, и др. К этому ряду следует отнести и физику МГД волн.

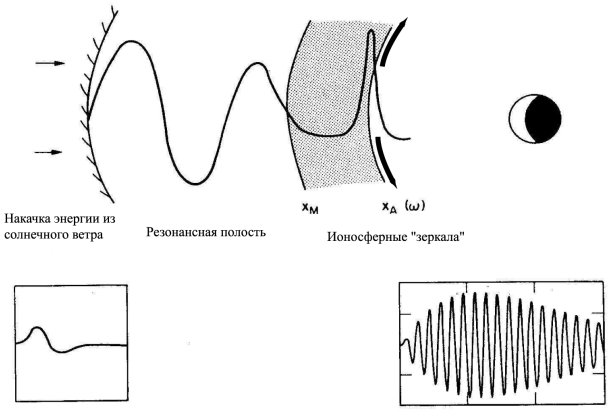

Рис. 4: Качественная иллюстрация работы магнитосферного мазера для МГД волн, в который накачиваются шумы солнечного ветра, которые затем фильтруются по частоте в магнитосферном резонаторе, и высвечиваются к земной поверхности через полупрозрачные зеркала (ионосферы). Резонансная оболочка X_A находится в области непрозрачности для магнитозвуковых возмущений с точкой отражения X_M

Рис. 5: Д.ф.-м.н. Евгений Николаевич Федоров, решивший задачу Д. Данжи о спектре МГД волн в магнитосфере

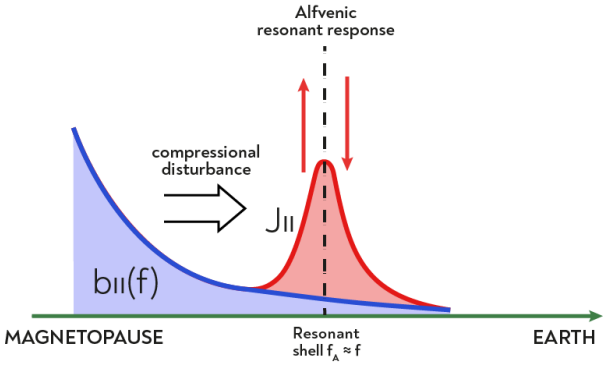

Рис. 6: Качественная иллюстрация резонансной теории УНЧ волн, согласно которой МГД возмущения из внешних областей в процессе распространения вглубь магнитосферы трансформируются в нестационарные продольные токи (альвеновские колебания) на резонансной оболочке. Эта наглядная и простая картина опирается на математическое обоснование, данное Е. Н. Федоровым

3 Некоторые открытия в области МГД волн, сделанные советскими исследователями

Советскими геофизиками был сделан ряд открытий в области физики МГД и УНЧ волн, которые общепризнаны мировым сообществом, и к настоящему продолжают интенсивно развиваться. Безусловным лидером работ в СССР по экспериментальному изучению геомагнитных пульсаций была В. А. Троицкая – заведующая отделом электромагнитного поля Земли в ИФЗ. По существу, для исследований по физике УНЧ волн в СССР она сыграла такую же роль, как И. В. Курчатов – для атомного проекта. Теория геомагнитных пульсаций и основы интерпретации наблюдений природных УНЧ излучений были разработаны в значительной степени А. В. Гульельми – заведующим лабораторией в Обсерватории Борок. Но ниже мы обратим внимание на ученых, получившим фундаментальные результаты в физике УНЧ волн, но которым почти не уделялось внимания в исторической литературе.

3.1 Альвеновский континуум в неоднородной плазме

Альвеновские МГД волны в плазме принципиально отличаются от волновых процессов в оптике, акустике или сейсмологии. Альвеновские волны можно качественно представлять, как колебания струн в арфе. Их спектр даже в ограниченной системе непрерывен, а собственные функции сингулярны, что приводит к удивительным особенностям этих волн: одномерному характеру распространения вдоль магнитного поля и отсутствию геометрического затухания, возможности переноса нестационарного продольного тока вдоль силовых линий на большие расстояния, отсутствию незатухающих решений даже в бездиссипативной системе, необратимой конверсии магнитозвуковых возмущений в альвеновские волны. Поэтому физическое понимание свойств связанных МГД мод в пространственно-неоднородной плазме в криволинейном магнитном поле (задача Данжи) долгое время вызывало трудности у геофизиков. Математически строгое описание сингулярного волнового поля в окрестности резонансной оболочки впервые получено сотрудником ИФЗ Е. Н. Федоровым (рис. 5) с помощью качественной теории дифференциальных уравнений. Им с соавторами было дано строгое обоснование основных принципов теории альвеновского резонанса для многомерно-неоднородных плазменных конфигураций и показано, что сингулярный характер поля МГД волны в области резонанса сохраняется и в плазменных конфигурациях с многомерной неоднородностью [*Alperovich и Fedorov*, 2007]. Оказалось, что пространственную структуру поля УНЧ пульсаций можно качественно представить в виде суперпозиции сигнала источника и резонансного отклика магнитосферного альвеновского резонатора. Согласно представлениям резонансной теории, МГД возмущения из внешних областей в процессе распространения в глубь магнитосферы трансформируются в альвеновские колебания (рис. 6). Наиболее эффективен процесс трансформации на геомагнитной широте, где частота внешнего источника f совпадает с локальной частотой f_R собственных альвеновских колебаний геомагнитной силовой линии, т.е. Резонансный отклик магнитосферы сильно локализован по широте и вызывает резкое изменение хода амплитуды и фазы пульсаций при переходе через резо-

Рис. 7: К.ф.-м.н. Леодан Николаевич Баранский — создатель градиентного метода гидромагнитной диагностики околоземной плазмы

нансную оболочку. Конверсия МГД волн в области альвеновского резонанса, впервые предложенная для интерпретации структуры УНЧ волн в магнитосфере Земли, ныне широко используется в работах по управляемому термоядерному синтезу для радиочастотного нагрева плазмы [*Hasegawa и Chen*, 1974]. Альвеновский резонанс является примером идей, зародившихся в геофизике, а затем перенесенных в фундаментальную физику плазмы.

3.2 Гидромагнитная сейсмология околоземной плазмы

Для исследования плазменных процессов в ближнем космосе УНЧ волны имеют такое же значение, как сейсмические волны для изучения строения Земли. Однако есть принципиальное отличие в подходах к геофизическому использованию УНЧ волн. В отличие от сейсмологии для них весьма ориентировочно известны свойства источников (местонахождение, спектральный состав и т.п.). Тем не менее была найдена принципиальная возможность использования регистрируемых на земной поверхности Pc3-5 пульсаций для гидромагнитной диагностики – определения свойств магнитосферной и ионосферной плазмы. Физической основой гидромагнитной диагностики является эффект резонансной трансформации МГД волн в магнитосфере. Резонансная частота (т.е. собственная частота альвеновских колебаний силовых линий) определяется для данной геомагнитной оболочки локальными свойствами распределения магнитосферной плазмы, а добротность магнитосферного резонатора – диссипативными свойствами ионосферы. Таким образом, уверенное выделение резонансных эффектов открывает возможность мониторинга плотности околоземной плазмы и проводимости ионосферы по наземным данным. Как было показано сотрудником ИФЗ Л. Н. Баранским (рис. 7), наиболее эффективным образом отстроиться от влияния спектра источника и выделить локальные резонансные особенности удается с помощью либо градиентных методов, основанных на прецизионных измерениях поля УНЧ пульсаций на малой базе, либо поляризационных методов, опирающихся на определении амплитудно-фазовых соотношений между компонентами поля волны в данной точке [*Baransky и др.*, 1995]. Разработанный Л. Н. Баранским метод градиентных наблюдений на двух широтно-разнесенных идентичных магнитометрах широко применяется для восстановления профиля распределения магнитосферной плазмы как в радиальном направлении, так и вдоль силовой линии [*Menk и Waters*, 2013]. Пример разностной фазовой сонограммы пульсаций показан на рис. 8, где четко выделяется резонансная частота магнитной оболочки между двумя разнесенными по широте станциями. В настоящее время «гидромагнитная сейсмология» – восстановление параметров плазмы и магнитного поля по спектральным характеристикам МГД колебаний, применяется для диагностики параметров плазмы атмосферы Солнца [*Nakariakov и др.*, 2016].

3.3 Новые типы УНЧ волн на высоких широтах

Высокие геомагнитные широты имеют особое значение для космической геофизики. В силу особенностей топологии околоземного магнитного поля именно эти широты геомагнитно сопряжены с пограничными областями магнитосферы, где происходят основные процессы взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. Это взаимодействие имеет нестационарный и турбулентный характер. Существование естественных МГД резонаторов и волноводов в околоземной плаз-

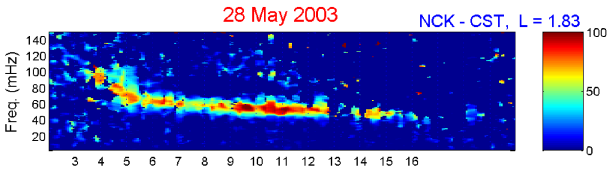

Рис. 8: Градиентный метод Л. Н. Баранского в действии: пример разностной фазовой сонограммы пульсаций, где по экстремуму разности фаз четко выделяется резонансная частота магнитной оболочки между двумя разнесенными по широте станциями NCK-CST

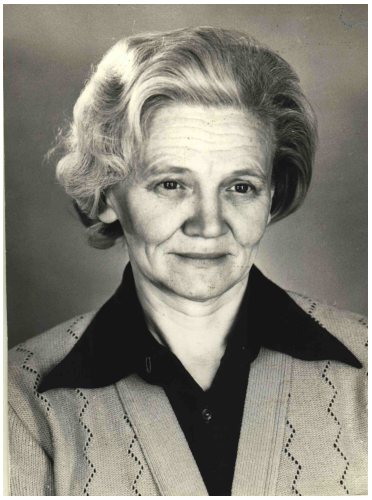

Рис. 9: Д.ф.-м.н. Ольга Васильевна Большакова — первооткрыватель новых типов высокоширотных УНЧ пульсаций

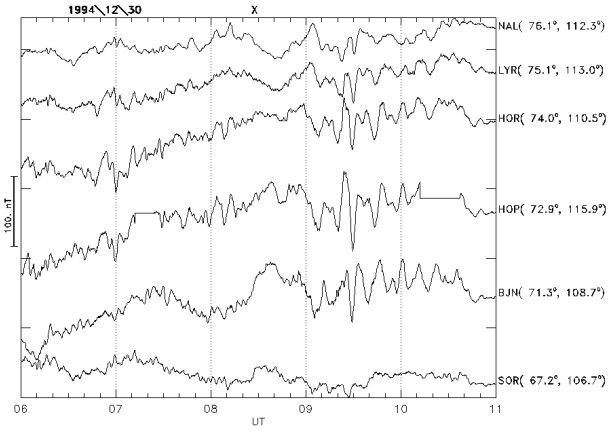

Рис. 10: Пример высокоширотных IPCL пульсаций, обнаруженных и изученных О. В. Большаковой, по данным широтного профиля станций на Шпицбергене

ме приводит к квазипериодическому отклику на внешнее воздействие, поэтому УНЧ волны на высоких широтах оказываются индикатором такого взаимодействия. Однако наиболее интересные для изучения солнечно-земных связей области из-за тяжелых климатических условий труднодоступны для регулярных геофизических наблюдений. Только благодаря развертыванию советских геофизических обсерваторий, способных работать в условиях Арктики и Антарктики, стали доступны данные геомагнитных наблюдений на очень высоких широтах.

Существенной проблемой геофизики в СССР было отсутствие цифровой записи и слабая компьютерная оснащенность. Любое исследование требовало скрупулёзного просмотра многих километров бумажных записей. Проведенный сотрудницей обсерватории Борок ИФЗ О. В. Большаковой (рис. 9) с коллегами колоссальный труд по анализу высокоширотных геомагнитных данных привел к открытию новых специфических типов УНЧ волн и сигналов. На рис. 10 показан пример иррегулярных квази-периодических пульсаций IPCL (Irregular Pulsations at Cusp Latitudes), наблюдаемых на сети станций на Шпицбергене. По-видимому, эти пульсации связаны с динамикой дневных пограничных слоев магнитосферы, но физическая природа этих пульсаций так окончательно и не установлена [*Большакова, Клейменова и др.*, 1988].

В области ионосферной проекции дневных пограничных слоев обнаружены пульсации, представляющие собой отклик высокоширотной дневной ионосферы на крупномасштабные альвеновские волны в солнечном ветре. При определенной ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) и геомагнитных силовых линий, когда происходит их частичное пересоединение, малые квазипериодические вариации ММП с амплитудами ~ 10 нТ стимулируют наземные возмущения на полтора порядка большей амплитуды (~ 400 нТ) [*Большакова, Клайн и др.*, 1987]. Практически постоянно существующие в области дневного каспа иррегулярные пульсации усиливаются в подготовительную фазу суббури, указывая на увеличение турбулентного потока энергии в магнитосферу [*Большакова, Боровкова и др.*, 1997].

Область внутри овала полярных сияний – полярная шапка – долгое время не рассматривалась как возможный объект для поиска УНЧ волн из-за отсутствия альвеновских резонансов на разомкнутых силовых линиях геомагнитного поля. Неожиданно в области полярной шапки была также обнаружена высокая активность квазимонохроматических Pc3 волн, которые обычно наблюдались только на средних широтах [*Большакова и Троицкая*, 1984]. Тем самым, обнаружен еще один канал проникновения волновой энергии к земной поверхности – через фланги магнитосферы, в области силовых линий, сносимых солнечным ветром в ночной хвост магнитосферы.

3.4 Генерация низкочастотных Pc5 волн энергичными частицами

Волновые возмущения в околоземном пространстве могут возбуждаться не только при непосредственном воздействии потока солнечного ветра на магнитосферу Земли, но и в результате спонтанной генерации в неравновесной плазме. Основной источник свободной энергии для роста плазменных неустойчивостей – потоки энергичных про-

Рис. 11: Д.ф.-м.н. Олег Александрович Похотелов, разработавший основы теории возбуждения мелкомасштабных УНЧ волн энергичными протонами кольцевого тока и теорию вихревых структур в бесстолкновительной плазме

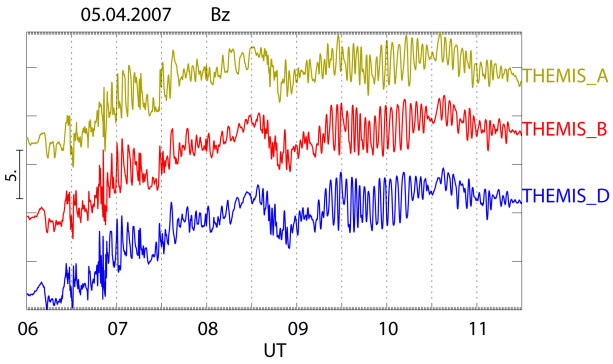

Рис. 12: Пример пульсаций диапазона Pc5, возбуждаемых неустойчивостями потока протонов кольцевого тока, по данным магнитометров спутников Themis. Теория этих неустойчивостей была построена О. А. Похотеловым

тонов кольцевого тока. Квази-дипольное геомагнитное поле образует ловушку для энергичных частиц, в которой движение частиц имеет характерные периодичности – циклотронное вращение в магнитном поле, баунс-осцилляции вдоль силовых линий между точками отражения, и дрейф вокруг Земли (магнитный дрейф). Эти периодичности приводят к резонансному обмену энергией между частицами, захваченными в магнитосфере, и собственными альвеновскими колебаниями силовых линий. Хотя теория кинетических резонансных неустойчивостей в горячей плазме активно развивается в общей физике плазмы, интерпретация наблюдений УНЧ волн в магнитосферной плазме потребовала разработки новых теоретических моделей, учитывающих конечное давление плазмы, сопоставимое с давлением магнитного поля; многокомпонентность плазмы – наличие холодных и горячих частиц; анизотропию продольной и поперечной температур, и дрейфовые эффекты, обусловленные резкими градиентами потоков частиц. Обнаруженные сотрудником ИФЗ О. А. Похотеловым (рис. 11) с соавторами неустойчивости оказались новыми не только для космической геофизики, но и для физики плазмы в целом [*Petviashvili и Pokhotelov*, 1992]. Проведенный ими цикл теоретических исследований привел к построению полной картины возможных механизмов возбуждения колебаний диапазона Pc5 в периоды магнитных бурь, когда резко усиливается интенсивность потоков частиц в магнитосфере Земли, которая хорошо согласуется с результатами спутниковых наблюдений. На рис. 12 дан пример пульсаций диапазона Pc5 (периоды порядка нескольких минут), возбуждаемых неустойчивостью протонов кольцевого тока, которые были зарегистрированы спутниками Themis. Характерная особенность этих волн – малая скорость распространения в азимутальном направлении ~ 10 км/с.

3.5 УНЧ волны и радиационный пояс

По аналогии с гидродинамикой взаимодействие турбулентного потока солнечной плазмы с магнитосферой Земли принципиально отличается от взаимодействия с ламинарным потоком. В турбулентной плазме может происходить стохастическое ускорение частиц до значительных энергий. Наличие волн в плазме приводит к появлению более эффективных резонансных механизмов ускорения. Профессор НИИЯФ МГУ Б. А. Тверской (рис. 13) теоретически предсказал, что именно УНЧ волны и импульсы ускоряют энергичные электроны во внешнем радиационном поясе до релятивистских энергий. Предложенный им механизм является своеобразным «геосинхротроном» – крупномасштабные УНЧ волны резонансным образом воздействуют на дрейфующие вокруг Земли электроны внешнего радиационного пояса, что приводит к их бетатронному ускорению и радиальному дрейфу (рис. 14). Эти вопросы представляют интерес не только для фундаментальных исследований, т.к. рост потоков релятивистских электронов оказывает негативное влияние на работу космических аппаратов, приводя к сбоям в электронике, дифференциальной зарядке диэлектриков с последующим пробоем, повреждение панелей солнечных батарей [*Пилипенко и Романова*, 2005; *Пилипенко, Романова и Чижен-ков*, 2006]. В связи с этим релятивистские магнитосферные электроны даже получили название «электроны-убийцы» (killer electrons). Таким образом, в бесстолкновительной околоземной плаз-

Рис. 13: Проф. Борис Аркадьевич Тверской, заложивший основы теории формирования радиационных поясов Земли

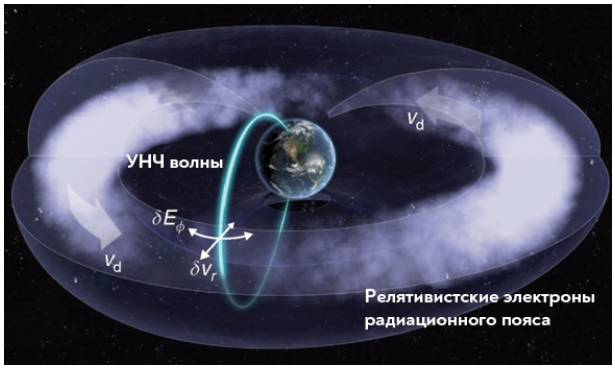

Рис. 14: Иллюстрация механизма «геосинхротрона», предложенного Б. А. Тверским, – резонансного воздействия крупномасштабных УНЧ волн на дрейфующие вокруг Земли электроны внешнего радиационного пояса, что приводит к их ускорению и радиальному дрейфу

ме именно волны являются тем посредником, который передает энергию от основной массы частиц небольшой группе релятивистских электронов.

3.6 Магнитотеллурическое зондирование земной коры

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) – один из методов зондирования земной коры, использующий измерения УНЧ электромагнитного поля. Метод разработан в 1950 г. советским геофизиком А. Н. Тихоновым – заведующим отделом математической геофизики в Институте теоретической геофизики АН СССР (в настоящее время – ИФЗ), где он проработал до 1953 г. (рис. 15). В настоящее время метод широко используется как один из основных методов разведочной геофизики. Источниками электромагнитного поля для МТЗ являются естественные УНЧ колебания. Метод основан на том, что глубина проникновения электромагнитного поля в среду зависит от электрической проводимости самой среды и от частоты поля из-за скин-эффекта. В простейшем варианте МТЗ изучается зависимость от частоты кажущегося удельного сопротивления, определяемого по отношению напряжённостей электрического и магнитного полей (поверхностный импеданс), измеренных на поверхности Земли, при этом земная кора предполагалась горизонтально-слоистой. В дальнейшем метод значительно развился и теперь может применяться благодаря мощным вычислительным ресурсам и к 3D моделям проводимости Земли. Именно для решения обратной задачи МТЗ А. Н. Тихоновым было введено в математику фундаментальное понятие некорректных обратных задач (имеет множество различных решений, из которых необходимо выбирать геофизически наиболее достоверное).

Рис. 15: Мемориальная доска академика АН СССР Андрея Николаевича Тихонова, создателя магнитотеллурического метода, на здании факультета ВМК МГУ

4 Возмущения геомагнитного поля антропогенного и литосферного происхождения

Детальное знание морфологии и природы естественных вариаций геомагнитного поля, позволяют среди хаоса возмущений, просачивающихся на Землю из околоземного пространства через ионосферу, выделить слабые аномальные сигналы, не связанные с источниками космической природы:

- антропогенные возмущения (удаленные взрывы, старты ракет);

- сейсмо-электромагнитные возмущения, возникающие при подготовке землетрясений.

Начатые в СССР работы по изучению сейсмо-электромагнитных и сейсмо-ионосферных явлений указывают, что эти процессы связаны с выделением большого количества энергии и затрагивают все геофизические оболочки (литосферу, атмосферу, ионосферу и магнитосферу) и геофизические поля. Качественная картина возможных механизмов связи процессов в литосфере, атмосфере и ионосфере дана на рис. 16. Сейсмо-электромагнитные явления служат чувствительным индикатором процессов развития землетрясений и могут эффективно использоваться для разработки дополнительных несейсмических методов прогноза землетрясений. Из-за частотно-зависимого ослабления электромагнитных возмущений в проводящей земной коре именно УНЧ диапазон (0,01–10 Гц) оказывается наиболее перспективным для поиска сигналов от источников в области очага готовящегося землетрясения. Получены обнадеживающие результаты, указывающие на появление аномальных шумов и импульсов за часы–дни до отдельных сейсмических событий [*Гохберг и др.*, 1988].

Зона подготовки сильного землетрясения имеет характерные размеры порядка сотен и тысяч километров. Крупномасштабный характер аномалий может помочь их обнаружению дистанционными наблюдениями за состоянием ионосферы Земли. По существу, ионосферу можно представлять как пленку легкоподвижной плазмы на удалении ~ 100 км от земной поверхности, чутко реагирующую на крупномасштабные приземные возмущения даже небольшой амплитуды. При этом мелкомасштабные и некоррелированные приземные флуктуации быстро ослабевают с высотой.

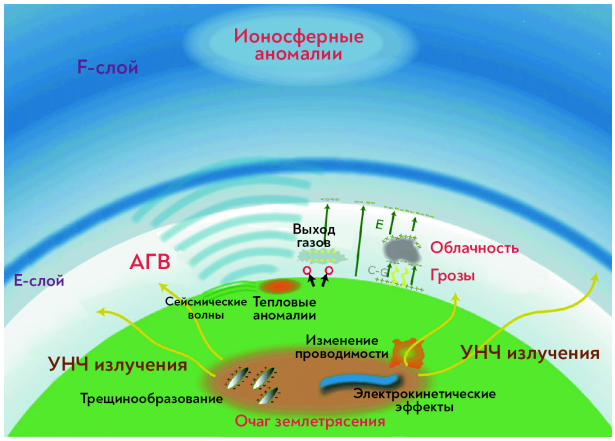

Рис. 16: Схематическое изображение сейсмо-ионосферных и сейсмо-электромагнитных эффектов

Непосредственным агентом переноса возмущений на ионосферные высоты могут быть акустико-гравитационные атмосферные волны (АГВ) с периодами более 10 мин. Характерная особенность АГВ – нарастание их амплитуды по мере распространения вверх в атмосферу с экспоненциально падающей плотностью. Ионосферная плазма обладает собственной свободной энергией, поэтому даже сравнительно слабое внешнее воздействие может стимулировать каскад плазменных и электромагнитных процессов. Образующиеся при этом плазменные неоднородности могут быть зафиксированы низколетящими спутниками и наземными установками зондирования ионосферы. Пионерские работы по поиску сейсмо-ионосферных связей по данным наземного зондирования и спутниковых наблюдений, начатые советскими исследователями, в настоящее время активно развиваются в зарубежных прогнозных и космических центрах.

5 Эксперименты по изучению природы УНЧ возмущений геомагнитного поля

Геофизические исследования в СССР существенно проигрывали зарубежным работам по оснащенности цифровыми системами регистрации и компьютерной техникой анализа данных. Однако, были определенные преимущества, которые позволяли проводить уникальные эксперименты. В СССР существовали независимые финансовые системы – безналичный оборот и наличные средства. Поскольку безналичные средства было невозможно «положить в карман» – перевести в наличные, то они тратились только на аппаратуру, экспедиции, и т.п., что позволяло провести весьма дорогостоящие эксперименты. Другая особенность – наличие громадной территории, позволяющее проводить глобальные наблюдения, от полярных широт до приэкваториальных, и от Дальнего Востока до Восточной Европы (более 1/3 земного шара по долготе). Потому зарубежные научные центры охотно сотрудничали с советскими коллегами для осуществления глобальных наблюдений. Вот несколько примеров таких экспериментов.

5.1 Эксперимент МАССА

Он посвящен изучению трансформации движений атмосферы в возмущения ионосферной плазмы и электромагнитного поля Земли (рук. – сотрудники ИФЗ М. Б. Гохберг и Л. С. Альперович). Предшествующие эксперименты по изучению динамического взаимодействия между атмосферными волнами и ионосферой показали, что иono-

сфера может служить чувствительным индикатором естественных и антропогенных источников. Результаты наблюдений хорошо укладывались в простую физическую картину: акустическая волна, распространяющаяся вверх в атмосфере с экспоненциально убывающей плотностью, увеличивает амплитуду и на больших высотах модулирует плотность ионосферной плазмы. О высокой чувствительности ионосферы свидетельствуют зарегистрированные эффекты даже от сравнительно слабых возмущений – пролетов сверхзвуковых самолетов, удаленных запусков ракет, землетрясений. В этих экспериментах ионосфера, по существу, играла роль пассивного экрана для зондирующих радиосигналов.

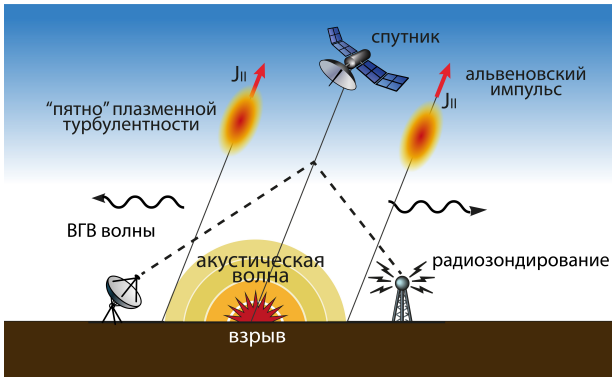

Рис. 17: Схематичное изображение эксперимента МАССА

Эксперимент МАССА впервые показал, что существенную роль играет и взаимодействие нейтральной и ионизованной компонент ионосферной плазмы [*Альперович и др.*, 1983]. Был проведен мощный (200 кТ) наземный взрыв, отклик на который регистрировался различными системами ионосферного зондирования и бортовой аппаратурой низкоорбитального спутника Ореол-3 (800 км). На качественном уровне можно представлять, что достигающие Е-слоя ионосферы нелинейные акустические возмущения с крутыми фронтами приводят к генерации локальных струй продольного тока вдоль силовых линий (альвеновского импульса) (рис. 17). Об эффективности генерации МГД возмущений акустическими движениями впервые стало известно благодаря наблюдениям на спутнике Ореол-3, скоординированным с моментом взрыва. При подлете спутника к области взрыва был зарегистрирован альвеновский импульс с магнитной и электрической компонентами ~ 10 нТл и ~ 10 мВ/м.

Эксперименты МАССА впервые показали возможность реализации в ионосфере нескольких каскадов трансформации акустических возмущений в различные типы электромагнитных колебаний с перераспределением энергии вверх по спектру. Интенсивный импульс продольного тока стимулирует генерацию в результате плазменной неустойчивости высокочастотной турбулентности. На ионосферном спутнике эти мелкомасштабные колебания будут зарегистрированы в виде всплеска электростатических шумов. Хотя пятно электростатических шумов будет медленно расплываться и ослабевать из-за амбиполярной диффузии, его время жизни оказывается больше, чем у породившего его альвеновского импульса. Рассмотренный сценарий подтвердился при наблюдениях ионосферных эффектов от подземных ядерных взрывов [*Амрамина и Пилипенко*, 2018].

5.2 Проект Геомагнитный Меридиан 145°

Первые 50 лет освоения космоса можно считать золотой эрой для магнитосферных исследований. Создано огромное множество ресурсов для изучения магнитосферы Земли и околосолнечного пространства. В сочетании с постоянно развивающимися теориями и новыми моделями, с опорой на новые методы и услугами интеллектуального анализа космических данных, быстро продвигалось понимание физики космических явлений. Проведение сложных экспериментов послужило основой для мировых исследований на долгие годы. Проект Геомагнитный Меридиан 145° (ГМ-145) (рук. – сотрудник ИЗМИРАН А. Н. Зайцев) сыграл важную роль в развития космической геофизики в СССР. Авроральные токи проявляется в виде мощных индукционных наводок в газопроводах и энергетических сетях, создают помехи для точной ГЛОНАСС-GPS навигации, приводят к существенным ошибкам при наклонном бурении и электромагнитной геофизической разведки. Отсюда возникает важная задача и потребность точного описания состояния магнитного поля в виде открытой справочно-информационной системы в реальном времени, используемой как для научных изысканий, так и для практических работ.

Метод исследований на геомагнитных меридианах для оценки состояния околоземного космического пространства по наземным данным и для изучения структуры и динамики токовых систем в ионосфере и магнитосфере в сопоставлении с прямыми измерениями на спутниках был развит в начале 70-х годов. В 1973 г. сеть магнитометров на геомагнитном меридиане 145° была оформлена как международный проект в рамках программы «Международные Исследования Магнитосферы» [*Зайцев*, 1974]. По мере развития сетей магнитометров с середины 80-х гг. начали внедряться цифровые приборы, автоматизированные

системы сбора и обработки наземных и спутниковых данных в режиме открытых справочных систем в реальном времени. Главным направлением проекта ГМ-145 было создание магнитометрического полигона в зоне полярных сияний как основы исследований пространственно-временных характеристик возмущений магнитного поля Земли, который мог быть «протянут» от высоких широт до экватора. Большинство меридианов в других регионах планеты пересекают океаны, так что нет возможности поставить цепочки магнитометров на всем протяжении от высоких широт до экватора. Магнитные бури и авроральные суббури сопровождаются сильными токами на высотах слоя E ионосферы (высота 100–120 км) и развитием ярких полярных сияний. Плотные сети магнитометров являются наиболее простым, надежным и информативным способом исследований пространственно-временных характеристик ионосферных токов. В проекте ГМ-145 была создана такая плотная сеть, представленная на рис. 18. Сеть магнитовариационных станций с аналоговой записью работала с 1972 г., архив аналоговых магнитограмм (более 20 пунктов наблюдений за 20 лет) был сдан для международного обмена в системе Мировых центров данных. Начиная с 1985 г. часть станций была переведена с аналоговой регистрации на цифровую, которая хранится на сервере ИКИ (http://www.cosmos.ru/magbase).

Однако после 1991 г. проект ГМ-145 постепенно деградировал по мере выхода приборов из строя, сокращения наземных пунктов наблюдений и прекращения финансирования фундаментальной и прикладной науки. Работы по восстановлению ГМ-145, в той части которая сегодня известна под названием «Полярная геофизика Ямала», начались с 2009 г. Для эффективной научной работы планируется восстановить сеть магнитометров на всем протяжении меридиана вдоль географической долготы 75°, примерно совпадающей с магнитным меридианом 145°.

5.3 Магнитный меридиан 210°

Движущей силой этого проекта ММ-210 был профессор Kyohumi Yumoto из Университета Кюсю (рис. 19). В этом университете был разработан автономный магнитометр с цифровой системой сбора информации. Однако развёртывание сети таких магнитометров вдоль Японии и на сопряженных точках в Австралии дало возможность вести мониторинг геомагнитных возмущений и УНЧ волн только на средних широтах, которые с геофизической точки зрения были не так уж интересны. В 1994 г. профиль магнитных станций вдоль геомагнитного меридиана 210° был продлен до авроральных широт, благодаря сотрудничеству Университета Кюсю, ИКИР, ИКФИА, и ИФЗ. Впоследствии, проф. Yumoto установил новые станции в Юго-Восточной Азии, в результате чего сеть охватила широты от экватора до аврорального овала (рис. 20). Данные этой расширенной сети, названной MAGDAS, позволяют исследовать перенос электромагнитной энергии с высоких широт вплоть до экваториальных. Даже наиболее обширные сети магнитометров – канадская CARISMA, скандинавская IMAGE, и др. не могут в этом отношении сравниться с уникальным комплексом MAGDAS. Магнитные станции сети ММ-210 стали основой развернутого на Дальнем Востоке российского много-инструментального геофизического комплекса.

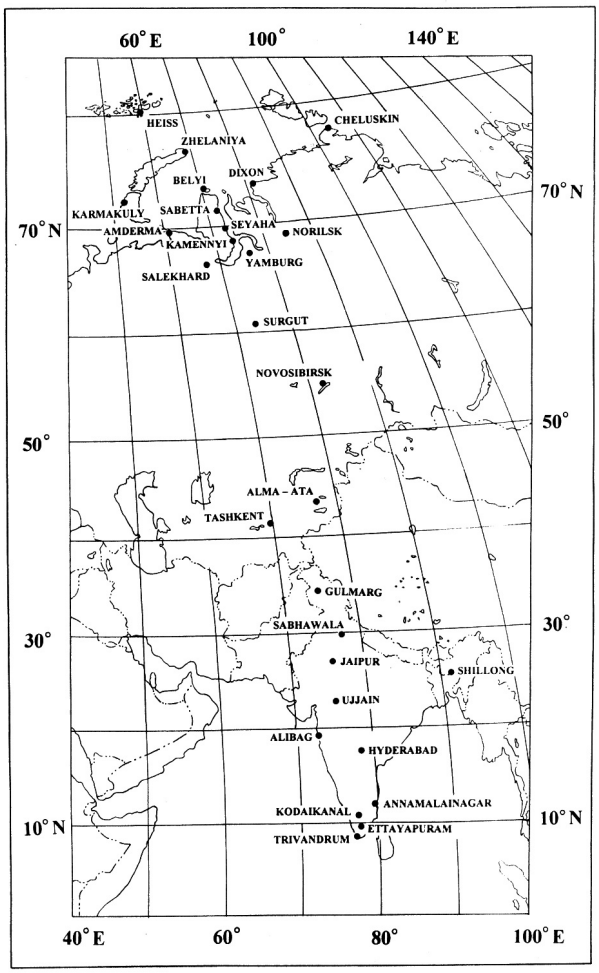

Рис. 18: Карта станций проекта Геомагнитный Меридиан 145° от Земли Франца-Иосифа через Ямал, Западную Сибирь, и далее через Казахстан и Индию, вплоть до геомагнитного экватора

Рис. 19: Профессор Kyohumi Yumoto — руководитель и организатор российско-японского проекта Магнитный меридиан 210°

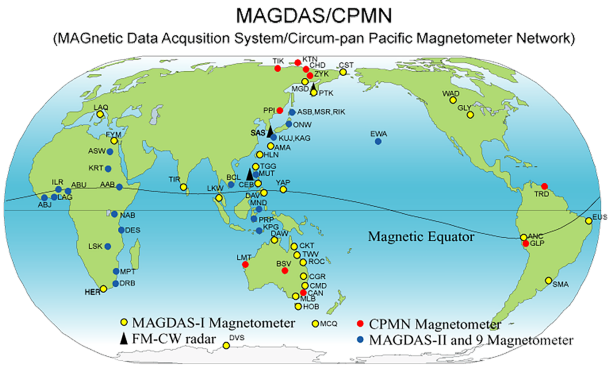

Рис. 20: Карта станций проекта MAGDAS, включающего российские станции в Восточной Сибири и на Камчатке

5.4 Наблюдения в Арктике и Антарктике

В прошедшем веке пионерские работы в Арктике и Антарктике принесли мировую известность советской геофизике [*Троицкая и др.*, 1988]. Из-за геометрии магнитного поля Земли, на российской территории нет возможности размещать на суше станции для наблюдения процессов в каспе и полярной шапке. Однако такая возможность существует благодаря пунктам наблюдения на Шпицбергене (Svalbard). Такая российская станция – Баренцбург действительно была открыта ПГИ. Еще раньше, геомагнитные наблюдения проводились на дрейфующих полярных станциях.

Научные коллективы СССР имели ведущие позиции в исследовании геомагнитных возмущений на очень высоких широтах, используя наблюдения на станциях в Антарктиде (Восток, Мирный, Комсомольская, Молодежная, Новолазаревская). Положение советских антарктических станций показано на рис. 21. Многие результаты ранних работ были позже воспроизведены западными исследователями, а некоторые до сих пор остаются «непереоткрытыми». Однако в нынешнем столетии, особенно в области солнечно-земной физики и космической погоды, ведущие позиции российской геофизики в мире оказались в значительной мере утерянными. В Антарктиде осталась единственная станция Восток, где ведутся непрерывные геомагнитные наблюдения с низким временным разрешением (1 мин), в Арктике таких станций лишь немногим больше, что значительно уступает по масштабам сетям геомагнитных станций США, Канады, Китая, Японии, и др.

Несмотря на существенное расширение мировой сети магнитных станций в Антарктиде, наблюдения, проведенные советскими специалистами, остаются уникальными. В период проведения экспериментов (с 1967 г.) южный геомагнитный полюс находился ближе всего к ст. Восток. С тех пор дрейф геомагнитных полюсов привел к тому, что положение южного геомагнитного полюса сместилось в океан. Южный геомагнитный полюс смещается со скоростью 10–15 км в год, несколько медленнее, чем северный геомагнитный полюс. В настоящее время ближе всего к южному геомагнитному полюсу находится итало-французская станция Dome-C. На ней ведутся геомагнитные наблюдения, но чувствительность и частота опроса аппаратуры позволяют регистрировать только излучения с периодами более 10 с. Поэтому наблюдения на ст. Восток с высокочувствительным индукционным магнитометром и высокой частотой регистрации (20 Гц) непосредственно вблизи геомагнитного полюса в глубине полярной шапки остаются уникальными.

Анализ антарктических данных, включая станцию Восток, в области полярной шапки привел к обнаружению новых типов квазипериодических УНЧ пульсаций диапазона Pc5–6 в полярной шапке [*Pilipenko и др.*, 2004]. Физические механизмы этих полярных пульсаций остаются невыясненными.

5.5 Заключение

История изучения УНЧ волн дает интересный пример непредсказуемости результатов научных исследований. Первые полевые магнитометрические работы, начатые в начале 50-х годов ИФЗ, ставили своей целью поиск электромагнитных шумов и возмущений в сейсмоактивных районах Средней Азии. Предполагалось, что в процессе растрескивания горной породы на подготовительной фазе землетрясения могут генерироваться электромагнитные импульсы. Неожиданно для исследователей магнитометры зарегистрировали длительные квазимонохроматические сигналы. Как было установлено в дальнейшем,

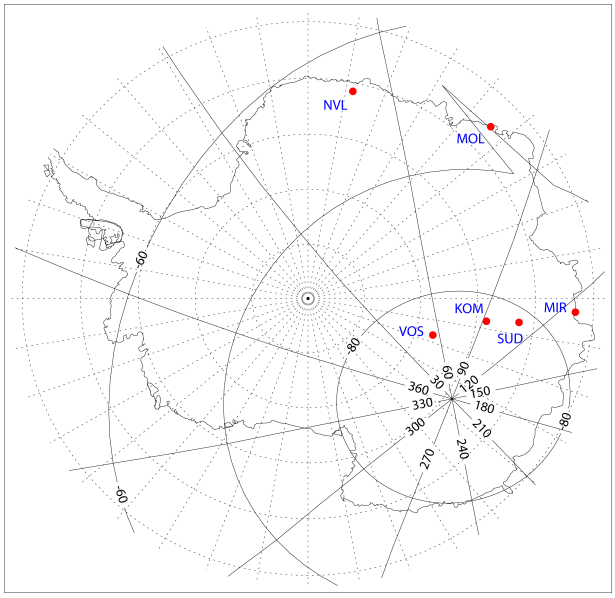

Рис. 21: Научные станции СССР в Антарктиде (Восток, Мирный, Комсомольская, Молодежная, Новолазаревская)

это были УНЧ волны, пришедшие из ближнего космоса. Поэтому дальнейшие исследования уже велись под знаком изучения природы естественных сигналов из околоземной плазмы. Удивительным образом, исследователи в конце концов получили свидетельства того, что на фоне сигналов космического происхождения, действительно возникают предвестниковые электромагнитные УНЧ шумы, предваряющие сильные землетрясения. Обнаружить аномальные электромагнитные возмущения, генерируемые в процессе разрушения горной породы за недели–часы до землетрясения, удалось благодаря накопленному многолетнему опыту изучения естественных сигналов и излучений.

Возмущения УНЧ диапазона, как оказалось, могут возникать и при искусственном воздействии на геофизические среды. В частности, излучения герцового диапазона были обнаружены на удаленных магнитных станциях после высотных ядерных взрывов. Таким образом был открыт ионосферный волновод для быстрых магнитозвуковых волн. Волны, захваченные в этот волновод, могут распространяться в нем на многие тысячи км. Это открытие подстегнуло интерес к УНЧ волнам, т.к. они могут служить средством дистанционного мониторинга ядерных испытаний в атмосфере (эти эффекты легли в основу закрытой диссертации В. А. Троицкой).

В изучение физики УНЧ волн, помимо перечисленных в обзоре ученых, внесли вклад и многие другие блестящие специалисты АН СССР, МГУ и ЛГУ, каждый из которых заслуживает отдельного рассказа. При этом все ученые того времени, помимо того, что были мощными лидерами в своей области, были и необыкновенно одаренными людьми и в литературе, искусстве, истории. По-видимому, такая широта интересов была проявлением того обстоятельства, что во времена СССР наука привлекала наиболее ярких и одаренных людей страны. Некоторые исторические аспекты исследований природы УНЧ волн и рассказы о людях, создававших эту науку, можно найти в обзорах и книгах [*Клейменова*, 2018; *Троицкая*, 2012]. Может данный обзор подтолкнет кого-нибудь написать для истории и о других ученых, поднявших отечественную геофизику на мировой уровень.

К настоящему время мировая сеть магнитных станций расширилась (> 300 постоянно работающих станций), значительно возросла чувствительность и средства сбора и хранения больших объемов данных. Однако к настоящему времени в геофизике «пора великих географических открытий» прошла, и с данными отдельной станции крайне маловероятно получить принципиально новые результаты. Поэтому в современной геофизике наблюдается переход к средствам анализа данных высокого уровня: глобальные индексы, 2D карты возмущенности и эквивалентных ионосферных токов, и др.

Космическая геофизика в целом достигла уровня, позволяющего ставить вопрос о реальном прогнозе «космической погоды» – состояния околоземной среды. Эта проблема становится все более актуальной, поскольку современные высокотехнологичные системы, особенно космические, весьма чувствительны к воздействию электромагнитных полей и радиации. Несмотря на мощный арсенал современной космической геофизики – солнечные радиотелескопы, космические станции между Землей и Солнцем, флотилии спутников на околоземных орбитах, сети наземных радаров и магнитометров, и т.п. – проблема прогноза космической погоды не стала «чисто инженерной». Солнечно-земное взаимодействие отчасти схоже с сейсмотектоническими процессами. Постоянно поступающая энергия потока солнечной плазмы не просто диссипирует в околоземном пространстве, а накапливается с ночной стороны магнитосферы, затем спонтанно высвобождается в виде мощных потоков ускоренных частиц и интенсивных глобальных токов. Магнитосферные бури и суббури оказываются своего рода «космотрясениями», механизмы которых остаются до сих пор окончательно невыясненными.

УНЧ электромагнитные поля являются эффективным средством слежения за процессами

в различных геофизических средах: магнитосфере, ионосфере, атмосфере и литосфере [*Гульельми*, 2007]. Излучения этого диапазона сопровождают все энергетически мощные геофизические процессы и служат одним из методов их диагностики и мониторинга. Однако потенциальные возможности УНЧ волн для мониторинга процессов в околоземном пространстве далеко не исчерпаны и, по существу, «гидромагнитная сейсмология» только зарождается. Качественно новый уровень в геофизических исследованиях произойдет при переходе от использования узко специализированных станций (магнитных, сейсмических, ионосферных, метеорологических) к развертыванию единой сети комплексных геофизических станций [*Пилипенко, Красноперов и др.*, 2019]. Все более дешевыми и доступными становятся устройства хранения данных большой емкости и спутниковые системы передачи информации. Это позволит в ближайшее время создать глобальные системы мониторинга в реальном времени за «электромагнитным дыханием» Земли и перейти от изучения околоземного космического «климата» к слежению за «космической погодой».

6 Благодарности

Обзор подготовлен в рамках госзаданий ИФЗ и ГЦ РАН. Выражаю признательность Э. О. Кедрову и Т. Е. Боровской за помощь в подготовке работы, и рецензенту за конструктивные замечания.

Институты и проекты, упомянутые в обзоре:

- ГЦ – Геофизический Центр РАН, Москва (http://www.gcras.ru/);
- ИФЗ – Институт физики Земли АН СССР им. О. Ю. Шмидта, Москва (https://www.ifz.ru/);
- ИЗМИРАН – Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова АН СССР, Троицк (http://www.izmiran.ru/);
- ИКИ – Институт Космических Исследований АН СССР, Москва (https://iki.cosmos.ru/);
- ИКИР – Институт Космофизических Исследований и Распространения Радиоволн ДВО АН СССР, Паратунка (http://www.ikir.ru/);
- ИКФИА – Институт Космофизических Исследований и Аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО АН СССР, Якутск (https://ikfia.ysn.ru/);
- ЛГУ – Ленинградский Государственный Университет им. А. С. Пушкина, Санкт-Петербург (https://lengu.ru/);
- МАССА (Магнитосферно-Атмосферные Связи при Сейсмо-Акустических явлениях) – эксперимент с наземным промышленным взрывом;
- МГУ – Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Москва (https://www.msu.ru/);
- НИИЯФ – Научно-Исследовательский Институт Ядерной Физики при МГУ им. Д.В. Скобельцына, Москва (http://www.sinp.msu.ru/);
- ПГИ – Полярный Геофизический Институт Кольского Научного Центра АН СССР, Мурманск, Апатиты (http://pgia.ru/);
- MAGDAS (MAGnetic Data Acquisition System) – глобальная японская сеть магнитометров (http://www.serc.kyushu-u.ac.jp);
- CARISMA (Canadian Array for Realtime Investigations of Magnetic Activity) – сеть магнитных станций в Канаде (https://www.carisma.ca);
- IMAGE (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects) – сеть магнитометров в Скандинавии (https://space.fmi.fi/image).

Список литературы

Альперович Л. С., Вугмейстер Б. О., Гохберг М. Б. *и др.* Об опыте моделирования магнитосферно-ионосферных эффектов при сейсмических явлениях // Доклады Академии наук. — 1983. — т. 269, № 3. — с. 573—578.

Амрамина А. А., Пилипенко В. А. Советско-американский проект по мониторингу подземных ядерных испытаний: научные, социальные и политические аспекты // Вестник ОНЗ РАН. — 2018. — № 10. — Z1103. — DOI: 10.2205/2018NZ000353.

Большакова О. В., Боровкова О. К., Клейменова Н. Г. Предвестник суббури в геомагнитных пульсациях дневного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. — 1997. — т. 37, № 4. — с. 148—151.

Большакова О. В., Клайн Б. И., Клейменова Н. Г. *и др.* Особенности широтного распределения очень долгопериодных пульсаций (vlp) на полярных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. — 1987. — т. 27. — с. 982—986.

Большакова О. В., Клейменова Н. Г., Куражковская Н. А. Динамика полярной шапки по наблюдениям долгопериодных геомагнитных пульсаций // Геомагнетизм и аэрономия. — 1988. — т. 28, № 4. — с. 661—665.

Большакова О. В., Троицкая В. А. Связь высокоширотного максимума интенсивности Pc3 с дневным каспом // Геомагнетизм и аэрономия. — 1984. — т. 24, № 5. — с. 776—779.

Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмоэлектромагнитные явления. — Москва : Наука, 1988. — с. 176.

Гульельми А. В. История становления сейсмоэлектродинамики // Наука и технологические разработки. — 2019. — т. 98, № 1. — с. 5—20. — DOI: 10.21455/std2019.1-1.

Гульельми А. В., Троицкая В. А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. — Москва : Наука, 1973. — с. 208.

Гульельми А. В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физических наук. — 2007. — т. 177, № 12. — с. 1257—1276. — DOI: 10.3367/UFNr.0177.200712a.1257.

Гульельми А. В., Потапов А. П. Волны от Солнца: К 100-летию со дня рождения В. А. Троицкой // Солнечно-земная физика. — 2017. — т. 3, № 3. — с. 95—99. — DOI: 10.12737/szf-33201709.

Зайцев А. Н. Проект Геомагнитный Меридиан // Вестник АН СССР. — 1974. — т. 4. — с. 92.

Клейменова Н. Г. Троицкая – основатель российской школы геомагнитных пульсаций // Физика Земли. — 2018. — т. 5. — с. 3—12. — DOI: 10.1134/s0002333718050083.

Леонович А. С., Мазур В. А. Линейная теория МГД колебаний в магнитосфере. — Издательство «Физматлит», 2016. — с. 480.

Пилипенко В. А., Красноперов Р. И., Соловьев А. А. Проблемы и перспективы геомагнитных исследований в России // Вестник ОНЗ РАН. — 2019. — т. 11, № 5. — Z1103. — DOI: 10.2205/2019nz000362.

Пилипенко В. А., Романова Н. В. Воздействие космической погоды на работу космических аппаратов // Геофизические Исследования. — 2005. — т. 2. — с. 71—82.

Пилипенко В. А., Романова Н. В., Чиженков В. А. Влияние космической погоды на спутниковые системы // Вестник РАЕН. — 2006. — т. 14. — с. 93—104.

Пилипенко В. А. Волновые геомагнитные поля в космосе и на Земле // Современные математические и геологические модели природной среды. — 2002. — с. 187—199.

Пилипенко В. А. Ультранизкочастотные волны в космосе и на Земле // Очерки геофизических исследований. — 2003. — с. 216—228.

Пудовкин М. И., Распопов О. М., Клейменова Н. Г. Возмущения электромагнитного поля Земли, ч. 2. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. — ЛГУ, 1976.

Троицкая В. А., Пудовкин М. И., Клейменова Н. Г. *и др.* Физические явления в дневных полярных каспах. — Москва : Наука, 1988. — с. 128.

Троицкая В. А. Телеграмма Берия. — Аграф, 2012. — с. 240.

Alperovich L. S., Fedorov E. N. Hydromagnetic waves in the magnetosphere and the ionosphere // Astrophysics and Space Science Library. — Netherlands, 2007. — Vol. 353. — P. 456.

Baransky L. N., Green A. W., Fedorov E. N., *et al.* Gradient and Polarization Methods of Ground-Based Monitoring of Magnetospheric Plasma. // Journal of geomagnetism and geoelectricity. — 1995. — Vol. 47, no. 12. — P. 1293–1309. — DOI: 10.5636/jgg.47.1293.

Hasegawa A., Chen L. Plasma Heating by Alfvén-Wave Phase Mixing // Physical Review Letters. — 1974. — Vol. 32, no. 9. — P. 454–456. — DOI: 10.1103/physrevlett.32.454.

Menk F. W., Waters C. L. Magnetoseismology. Ground-based remote sensing of Earth's magnetosphere. — Wiley VCH, 2013. — P. 251.

Nakariakov V. M., Pilipenko V., Heilig B., *et al.* Magnetohydrodynamic Oscillations in the Solar Corona and Earth's Magnetosphere: Towards Consolidated Understanding // Space Science Reviews. — 2016. — Vol. 200, no. 1–4. — P. 75–203. — DOI: 10.1007/s11214-015-0233-0.

Petviashvili V. I., Pokhotelov O. A. Solitary Waves in Plasmas and in the Atmosphere. — London : Gordon, Breach Science Publishers, 1992. — P. 248.

Pilipenko V. A., Yagova N. V., Chugunova O. M., *et al.* ULF waves at very high latitudes // Auroral Phenomena and Solar-Terrestrial Relations in Proceedings of the Conf. in Memory Yu. Galperin, 3–7 February 2003. — Boulder, SCOSTEP, 2004. — 193–199.

Walker A. D. M. Magnetohydrodynamic waves in geospace. — Institute of Physics, CRC Press, 2004. — P. 549. — (Series in Plasma Physics).