

Волновые геомагнитные поля в космосе и на Земле

Пилипенко В.А.

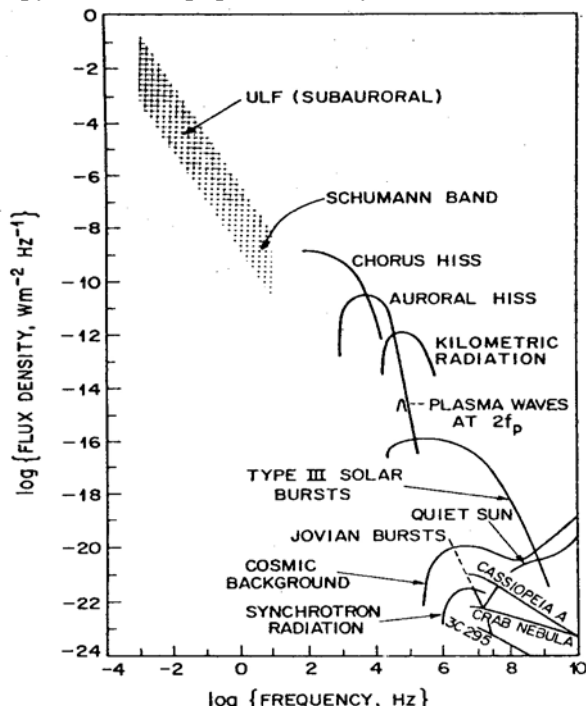
Институт физики Земли, Москва (pilipenk@augzburg.edu)

Аннотация

Дан краткий обзор физики волновых геомагнитных полей в СНЧ диапазоне, покрывающим три порядка по частоте, от мГц до Гц. В ходе изложения сделано сочетание описания теоретических моделей и анализа экспериментальных данных спутников и наземных станций. Выяснение физической природы широкого класса СНЧ волн и построение адекватных математических моделей позволило создать «гидромагнитную сейсмологию околоземного пространства», позволившую восстанавливать плотность плазмы в магнитосфере и ионосфере. Кроме того, СНЧ диапазон оказался наиболее перспективным для поиска электромагнитных шумов литосферного происхождения, связанных с процессами подготовки землетрясений.

Введение

Магнитогидродинамические (МГД) волны, пронизывающие все околоземное космическое пространство, доносят до земной поверхности информацию о свойствах окружающей Землю плазмы. Эти волны регистрируются спутниковыми и наземными магнитометрами в виде сверхнизкочастотных (СНЧ, или ultra-low-frequency, по западной терминологии) пульсаций геомагнитного поля диапазона 1 мГц–1 Гц. Пульсации геомагнитного поля были, по существу, первыми электромагнитными волнами, зарегистрированными при помощи примитивного магнитометра человечеством. Энергетически СНЧ волны являются самым мощным волновым электромагнитным процессом в околоземном пространстве. Действительно, сопоставление спектральной мощности излучений, регистрируемых в околоземном пространстве (рис. 1) показывает, что СНЧ волны по плотности потока на несколько порядков превосходят другие типы природных излучений.



в магнитосфере Земли, ныне широко используется в работах по управляемому термоядерному синтезу для радиочастотного нагрева плазмы.

Исследование плазменных и волновых явлений в околоземном пространстве опирается на математический аппарат и теоретические подходы, разработанные в физике плазмы и магнитной гидродинамике (МГД). Однако, нельзя сказать, что космическая геофизика занимается только приложением физических представлений, выработанных в общей физике плазмы. Можно вспомнить, что ряд принципиально новых физических идей, получивших затем широкое развитие, пришел в физику из космической геофизики: пересоединение силовых линий и аннигиляция магнитных полей, бесстолкновительные ударные волны. Сюда же следует добавить и рассматриваемые ниже представления о МГД волнах Альвена, отмеченного за их открытие Нобелевской премией в 1942 г. Конверсия МГД волн в области альвеновского резонанса, впервые предложенная для интерпретации структуры СНЧ волн в

Резонансная трансформация МГД волн

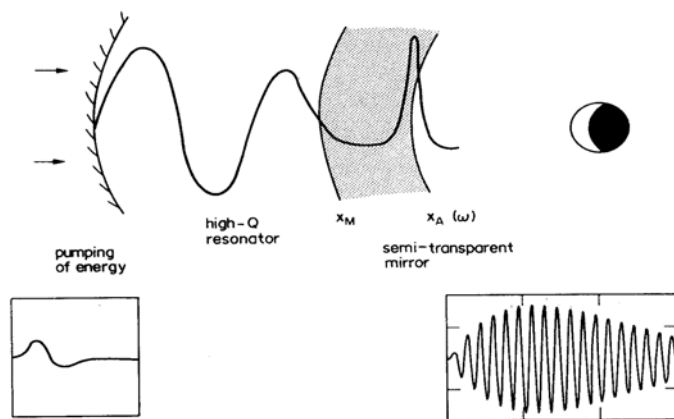
Альвеновские волны принципиально отличаются от обычных волновых процессов в оптике, акустике или сейсмологии. Их спектр даже в ограниченной системе непрерывен, а собственные функции сингулярны, что приводит к интересным особенностям этих волн: одномерному характеру распространения и отсутствию геометрического затухания, возможности переноса нестационарного продольного тока вдоль силовых линий, отсутствию незатухающих решений даже в бездиссипативной системе, необратимой конверсии магнитозвуковых возмущений в альвеновские волны [Pilipenko, 1990].

Согласно представлениям резонансной теории, МГД возмущения из внешних областей в процессе распространения в глубь магнитосферы трансформируются в альфеновские колебания. Наиболее эффективен процесс трансформации колебаний на геомагнитной широте Φ , где частота внешнего источника f совпадает с локальной частотой f_R собственных колебаний геомагнитной силовой линии, т.е. $f \approx f_R(\Phi)$. Математическое описание сингулярного волнового поля в окрестности резонансной оболочки получено с помощью качественной теории дифференциальных уравнений в виде асимптотического разложения:

$$b_y(x, f) = c_1 z^{-1} + c_2 \ln(z) + \dots;$$

$$b_x(x, f) = d_1 \ln(z) + d_2 + \dots; \quad z = x - x_R(f) + i\delta,$$

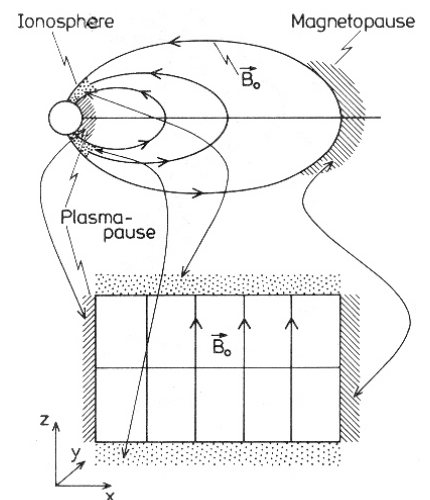
где x – координата вдоль меридиана; $x_R(f)$ – координата резонансной силовой линии; δ – полуширина резонансной области. Пространственную структуру поля пульсаций можно качественно представить в виде суперпозиции сигнала источника и резонансного отклика магнитосферного альфеновского резонатора (МАР). Резонатор образуется силовыми линиями геомагнитного поля, ограниченными сопряженными ионосферами. Сигнал источника обусловлен возмущением, переносимым крупномасштабной магнитозвуковой волной, и слабо зависит от координаты. Резонансный же отклик магнитосферы, связанный с возбуждением альфеновских колебаний, сильно локализован и вызывает резкое изменение хода амплитуды и фазы пульсаций при переходе через резонансную оболочку. При прохождении колебаний через ионосферу их пространственная структура сохраняется с учетом поворота плоскости поляризации на $\pi/2$ и некоторого "размывания" резонансного пика [Pilipenko et al., 2000b].



В целом, как схематично показано на рис. 2, магнитосфера подобна гигантскому мазеру для МГД волн, в который накапливаются шумы солнечного ветра, которые затем фильтруются в резонаторе, и высвечиваются через полупрозрачные зеркала (ионосферы). Как будет показано в дальнейшем, неравновесные распределения энергичных частиц в магнитосфере, подобно инверсной заселенности, могут усилить колебания в магнитосферном мазере.

Основные представления о МАР были первоначально сформулированы в рамках упрощенной одномерной модели (т.н.

magnetospheric box model, показанная на Рис. 3), в связи с чем до сих пор продолжают дискуссии о сохранении характерных особенностей МАР в более реалистичных ситуациях: при многомерной неоднородности, конечной температуре плазмы, наличии кинетических эффектов. Строгое обоснование основных принципов теории альфеновского резонанса для двумерно-неоднородных плазменных конфигураций было дано в работах [Федоров и др., 1995; Fedorov et al., 1995], где с использованием метода Фробениуса показано, что качественный характер трансформации МГД волны в области резонанса существенно не видоизменяется в двумерно-неоднородных плазменных конфигурациях. Сингулярный характер поля волны в окрестности резонансной оболочки сохраняется и в системах с многомерной неоднородностью альфеновской скорости.



Методы наземного мониторинга околоземной плазмы с использованием гидромагнитных волн

Для исследования плазменных процессов в ближнем космосе МГД волны имеют такое же значение, как сейсмические волны для изучения строения Земли. Однако есть принципиальное отличие в подходах к геофизическому использованию сейсмических и МГД волн. В отличие от сейсмологии для геомагнитных пульсаций весьма ориентировочно известны свойства их источников (местонахождение, спектральный

состав и т.п.). Тем не менее существует принципиальная возможность использования регистрируемых на земной поверхности геомагнитных пульсаций для гидромагнитной диагностики – определения свойств магнитосферной и ионосферной плазмы. Физической основой гидромагнитной диагностики является эффект резонансной трансформации МГД волн в магнитосфере. Резонансная частота $f_r(\Phi)$ определяется для данной геомагнитной силовой линии локальными свойствами распределения магнитосферной плазмы, а добротность МАР – диссипативными свойствами ионосферы и магнитосферы [Ягова и др., 1998; Yagova et al., 1999; Fedorov et al., 2001]. Таким образом, уверенное выделение резонансных эффектов и наличие надежных методов экспериментального определения параметров МАР открывает возможность мониторинга плотности околоземной плазмы и проводимости ионосферы по наземным данным.

Мониторинг резонансных частот локальных силовых линий существен не только для гидромагнитной диагностики, но и для более корректной интерпретации данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ) земной коры [Pilipenko, Fedorov, 1993; Pilipenko et al., 1998a]. Пренебрежение спецификой структуры поля СНЧ волн на резонансных частотах при интерпретации данных МТЗ над высокоомными разрезами может привести к ложным выводам о наличии локальных геоэлектрических структур в земной коре.

Наиболее эффективным образом отстроиться от влияния спектра источника и выделить локальные резонансные особенности удастся с помощью либо градиентных методов, основанных на прецезионных измерениях поля пульсаций на малой базе [Бест и др., 1986; Kurchashov et al., 1987; Пилипенко и др., 1988], либо поляризационных методов, опирающихся на соотношения между различными магнитными и электрическими компонентами поля волны в данной точке [Baransky et al., 1995].

Для изучения локальной структуры поля геомагнитных пульсаций диапазона Pc3–4 на средних широтах Институтом физики Земли РАН проводилась серия специализированных экспериментов [Грин и др., 1991; Green et al., 1993], в ходе которых синхронная регистрация пульсаций электромагнитного поля Земли велась на сети станций с разносом ~ 100 -200 км, расположенных вдоль геомагнитного меридиана. Результаты экспериментов показали, что градиентный метод позволяет определить резонансные эффекты Pc3-4 пульсаций даже для данных, искаженных влиянием геоэлектрической неоднородности подстилающих пород. Сравнение градиентных и поляризационных методов для определения собственной частоты силовых линий, ее радиального градиента и ширины резонансной области продемонстрировало применимость этих методов в качестве инструмента гидромагнитной диагностики магнитосферы. Для практического мониторинга вариаций резонансной частоты требовалось разработать несколько взаимоконтролирующих методов ее определения. Был предложен новый метод определения частоты МАР, основанный на расчете годографа отношения комплексных спектров сигнала на двух станциях [Курчашов, Пилипенко, 1996]. Анализ данных с помощью годографа позволяет получить больше информации о параметрах МАР, контролируя при этом устойчивость полученных оценок, по данным измерений в двух точках можно получить непрерывное распределение резонансных частот и добротностей МАР в конечном интервале широт, выходящем за широту точек наблюдения.

Анализ данных синхронных магнитных наблюдений на сети среднеширотных станций показал, что спектральный состав Pc3-4 колебаний на разных широтах может заметно изменяться от одной станции к другой даже на удалении менее 10^3 км [Пилипенко и др., 1997a]. Вид наблюдаемых спектров определяется преимущественно спектром источника пульсации и локальными свойствами МАР. Задача гидромагнитной спектроскопии, т.е. идентификации спектральных пиков, не может быть решена анализом спектров лишь одной компоненты СНЧ волн на конкретной станции. Для меридиональной сети выделение резонансных частот однозначным образом удастся провести с помощью градиентного метода, дополненного поляризационным методом. Используя экспериментально определенный набор резонансных частот, удалось восстановить характер распределения магнитосферной плазмы как в радиальном направлении, так и вдоль силовой линии, хорошо согласующийся со спутниковыми результатами [Pilipenko et al., 1999c].

Качественно новые особенности МАР начинают проявляться на очень низких геомагнитных широтах (ниже 30°), где значительная часть силовой линии оказывается погруженной в ионосферную плазму с тяжелыми ионами. Численные расчеты предсказывают, что эффект нагружения силовых линий тяжелыми ионосферными ионами должен приводить к резкому ухудшению добротности МАР на низких широтах [Юмото и др., 1993]. Данные цепочки низкоширотных станций действительно выявили резкое увеличение декремента затухания Pc3 колебаний по мере приближения к экваториальным широтам. Помимо значительного усиления ионосферного затухания, на низких широтах обнаружена аномальная зависимость резонансного периода $T_r(\Phi)$ – рост с уменьшением широты [Pilipenko et al., 1998c]. Эта особенность хорошо описывается численной моделью ионосферно-магнитосферного резонатора. Совместный анализ ионосферных и магнитосферных данных показывает, что наземные наблюдения геомагнитных пульсаций могут использоваться для мониторинга вариаций плотности плазмы в плазмосфере.

СНЧ волны 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 плазме приводит к квазипериодическому отклику на внешнее воздействие, поэтому СНЧ волны на высоких широтах оказываются индикатором такого взаимодействия.

Однако наиболее интересные для изучения солнечно-земных связей области из-за тяжелых климатических условий до недавнего времени были труднодоступны для регулярных геофизических наблюдений. Только в последнее десятилетие благодаря созданию надежных геофизических станций и систем сбора информации, способных работать в автономном режиме в условиях Арктики и Антарктики, стали доступны данные геомагнитных наблюдений на очень высоких широтах. Недавние исследования выявили новые специфические типы СНЧ волн и шумов и позволили установить механизмы их генерации [Pilipenko and Engebretson, 2002].

В области ионосферной проекции дневных пограничных слоев обнаружены пульсации, названные $P_{\text{СДРУ6}}$, 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 частичное пересоединение силовых линий, малые квазипериодические вариации ММП с амплитудами ~ 10 нТ стимулируют наземные возмущения на полтора порядка большей амплитуды (~ 400 нТ) [Pilipenko et al., 2000a]. Практически постоянно существующие в области дневного каспа иррегулярные пульсации усиливаются в подготовительную фазу суббури, указывая на увеличение турбулентного потока энергии в магнитосферу [Pilipenko et al., 1998b]. После взрывной фазы суббури эти колебания замирают.

Гидромагнитные турбулентные шумы из переходного слоя между магнитопаузой и ударной волной имеют возможность проникать через магнитопаузу и накапливаться в области геомагнитной воронки (каспа), где магнитное поле резко ослаблено [Pilipenko et al., 1999b]. Резонансная конверсия захваченных шумов в убегающие альвеновские волны приводит к появлению узкополосных $P_{\text{С3}}$ сигналов на широтах каспа. Несмотря на близость характерных частот, высокоширотные пульсации диапазона $P_{\text{С3}}$ и среднеширотные $P_{\text{С3}}$ пульсации обусловлены разными физическими механизмами [Pilipenko и др., 1996].

Область внутри овала полярных сияний, так называемая полярная шапка, до последнего времени не рассматривалась как возможный объект для поиска СНЧ волн из-за отсутствия альвеновских резонансов на разомкнутых силовых линиях геомагнитного поля. Однако анализ антарктических данных привел к обнаружению новых типов иррегулярных СНЧ волн в полярной шапке [Yagova et al., 2002a]. Генерация этих пульсаций, по видимому, связана с процессами импульсного высвобождения энергии в ночной магнитосфере [Мазур и др., 2001]. Установлено, что одни из этих колебаний, названные P_{icap3} , связаны с подготовительной фазой суббури в области хвоста магнитосферы [Yagova et al., 2000].

Генерация низкочастотных волн энергичными частицами

Волновые возмущения в околоземном пространстве могут возбуждаться не только при непосредственном воздействии потока солнечного ветра на магнитосферу Земли [Pilipenko и др., 1997b], но и в результате спонтанной генерации в неравновесной плазме. Основным источником свободной энергии для роста плазменных неустойчивостей – резкие неоднородности плотности энергичных протонов кольцевого тока. Хотя теория дрейфовых неустойчивостей, вызываемых неоднородностями горячей плазмы, активно развивается в физике плазмы, интерпретация наблюдений волн в магнитосферной плазме потребовала разработки новых теоретических моделей, учитывающих характерные особенности магнитосферной плазмы: конечное давление плазмы, сопоставимое с давлением магнитного поля ($\beta_{\perp} \ll 1$); многокомпонентность плазмы – наличие холодных и горячих частиц; анизотропия $A = T_{\perp} / T_{\parallel} - 1$ продольной и поперечной температур [Гохберг и др., 1980]. Обнаруженные неустойчивости оказались новыми не только для космической геофизики, но и для физики плазмы в целом [Похотелов и др., 1986].

Развит общий теоретический подход к исследованию низкочастотных колебаний в неоднородной анизотропной плазме конечного давления при резонансном взаимодействии волн с энергичными частицами. Зацепление различных мод поперечно-мелкомасштабных колебаний в такой плазме определяется эффектами конечного ларморовского радиуса ρ . Возмущения с поперечными длинами волн, большими ларморовского радиуса, т.е. $(k_{\perp} \rho)^2 \ll 1$, в плазме конечного давления распадаются на

независимые колебания – сжимаемую альвеновскую волну и дрейфово-зеркальную (ДЗ) моду магнитозвукового типа [Похотелов, Пилипенко, 1976; Пилипенко, Похотелов, 1977].

Исследование устойчивости такой плазмы относительно возбуждения длинноволновых возмущений дало следующую картину. На резких границах кольцевого тока, когда радиус кривизны геомагнитного поля R велик по сравнению с размером неоднородности a горячей компоненты плазмы, так что $\beta_{\perp}(k_{\perp}\rho)^2 > a/R$, возможно возбуждение дрейфово-анизотропной (ДА) неустойчивости [Pokhotelov et al., 1985]. Специфической особенностью неустойчивости является зацепление сжимаемых альвеновских волн и ДЗ моды, возникающее при значениях параметра $\Delta \approx A - \beta_{\perp}^{-1} \ll 1$. Теоретически предсказанная неустойчивость имеет значительно больший инкремент нарастания по сравнению с ранее известными. Анализ экспериментальных данных по пульсациям диапазона Pc5 (периоды порядка первых минут), зарегистрированным в магнито-возмущенный период на спутнике GEOS-2 и наземной радарной установке STARE, показал хорошее согласие наблюдаемых свойств этих колебаний с выводами теории. Колебания данного типа представляют собой фундаментальную моду стоячей сжимаемой альвеновской волны, раскачиваемой ДА неустойчивостью внутренней кромки кольцевого тока. Возбуждаемые колебания распространяются в долготном направлении с востока на запад со скоростью ларморовского дрейфа плазмы, порядка первых километров в секунду.

Вблизи максимума в радиальном распределении плотности горячей плазмы, когда справедливо обратное соотношение ($\beta_{\perp}(k_{\perp}\rho)^2 < a/R$), возбуждается модифицированная ДА неустойчивость [Pokhotelov et al., 1986]. В этом случае зацепление между модами обеспечивается кривизной геомагнитного поля и анизотропией плазмы. Модифицированная ДА неустойчивость имеет более низкий порог возбуждения по анизотропии энергичной компоненты по сравнению с ДА неустойчивостью. Детальный анализ данных магнитометра и спектрометра частиц геостационарного спутника GEOS-2 показал, что свойства СНЧ колебаний, регистрируемых в восстановительную фазу магнитных бурь, магнитного поля и потоков протонов кольцевого тока хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями, в частности, в моменты возбуждения колебаний действительно $\Delta \rightarrow 0$.

В том случае, когда инжекция горячей плазмы происходит настолько быстро, что ДА неустойчивости не успевают развиться, возникает условие для возбуждения волн магнитозвукового типа. Эти колебания локализованы в приэкваториальной плоскости магнитосферы таким образом, что $k_z \gg \omega/V_A$. Прямые спутниковые измерения, указывающие на малый продольный масштаб таких колебаний (так называемых "глобальных Pc5" из-за своей длительности, достигающей до десятков часов) заведомо исключают из рассмотрения альвеновские волны. Таким образом, вся детально исследованная ранее физика неустойчивостей альвеновских волн, которая получила убедительное экспериментальное подтверждение при наблюдениях других СНЧ колебаний, оказывается неприменимой к интерпретации глобальных Pc5. Создававшаяся ситуация может быть названа "альвеновской катастрофой" для теории магнитосферных СНЧ волн. Выход из этой ситуации был найден теорией модифицированной ДЗ неустойчивости [Woch et al., 1988], развивающейся при увеличенной кривизне геомагнитного поля и высоких анизотропных плотностях потоков энергичных частиц. Действительно, прямые спутниковые измерения показывают, что общая геофизическая ситуация в моменты возбуждения глобальных Pc5 волн благоприятствует развитию модифицированной ДЗ неустойчивости.

Возбуждение частицами квазимонохроматических колебаний диапазона Pc5 имеет место в фазу восстановления магнитной бури, когда неравновесные распределения горячих протонов медленно релаксируют к термодинамически устойчивому состоянию под действием кинетических дрейфовых неустойчивостей. В начальную фазу магнитной бури интенсивная инжекция энергичных протонов и электронов может сопровождаться нерезонансной генерацией интенсивных иррегулярных возмущений типа Pi3 [Pilipenko et al., 2001b]. Возбуждение СНЧ колебаний различных частотных диапазонов может также стимулироваться интенсивными магнитосферными токами вдоль силовых линий, питающими полярные сияния [Pilipenko et al., 1999a], и ионосферными токами вдоль аврорального овала (авроральным электроджетом) [Pilipenko et al., 2001a].

Проведенный цикл исследований привел к построению полной картины возможных механизмов возбуждения СНЧ колебаний в периоды магнитных бурь, когда резко усиливается интенсивность потоков частиц радиационных поясов Земли.

Возмущения геомагнитного поля антропогенного и литосферного происхождения

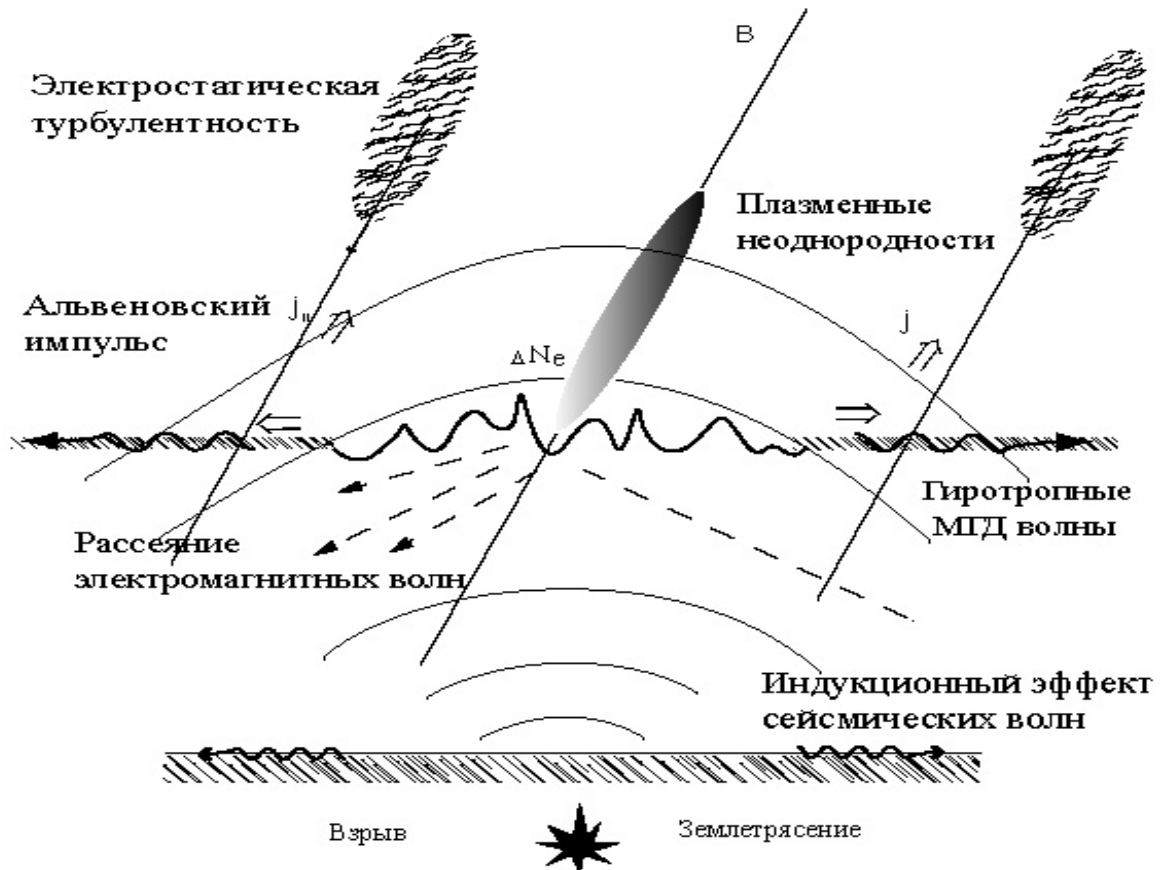
Детальное знание морфологии и природы естественных вариаций геомагнитного поля, описанные в предыдущих разделах, позволяют среди кажущегося хаоса возмущений выделить слабые аномальные сигналы, связанные с источниками не-ионосферной природы:

- антропогенные возмущения (наземные химические и подземные ядерные взрывы, старты ракет);
- метеоявления (ураганы, тайфуны, грозы);
- деформации и трещинообразование земной коры при подготовке землетрясений.

Все эти процессы связаны с выделением большого количества энергии и затрагивают все геофизические оболочки (литосферу, атмосферу, ионосферу и магнитосферу) и геофизические поля.

Взрывы, метеоявления и запуски ракет

В конкретной ситуации могут реализовываться различные механизмы воздействия взрывов на ионосферу [Pokhotelov et al., 1995] и геомагнитное поле [Surkov, Pilipenko, 1997], схематично показанные на рис. 4.



В месте проведения взрыва могут возникнуть приземные квази-стационарные возмущения, обусловленные остаточной намагниченностью. Распространяющиеся в земной коре или океане от места взрыва сейсмические волны благодаря индукционному эффекту порождают сопутствующий электромагнитный сигнал. Особенность сейсмо-индукционного сигнала заключается в том, что он появляется раньше, чем фронт сейсмической волны или волны цунами. Этот факт может быть использован для разработки систем оперативного отключения электропитания и подачи газа на промышленных производствах в сейсмоактивных регионах.

Акустическая волна от взрыва, достигающая ионосферных высот, индуцирует горизонтальные токи в проводящем слое ионосферы (E -слой). Система ионосферных токов оказывается незамкнутой и порождает продольные токи вдоль силовых линий геомагнитного поля на фронте акустического импульса. Импульс продольного тока может быть зарегистрирован на низкоорбитальном спутнике как импульс возмущения поперечной компоненты геомагнитного поля [Pokhotelov et al., 1995].

Возмущение верхней стенки волновода Земля–нижняя ионосфера акустической волной взрыва приводит к утечке вверх в магнитосферу электромагнитных шумов волновода. Наиболее интенсивные из них – на частоте шумановского резонанса ~ 8 Гц – могут привести к усилению электромагнитных излучений этого диапазона на спутниковых высотах. Такие эффекты действительно регистрировались на спутнике OGO-6 над местами взрывов [Гохберг и др., 1996].

Акустическая волна взрыва, порождающая интенсивный импульс продольного тока, стимулирует генерацию в результате плазменной неустойчивости высокочастотной турбулентности [Pokhotelov et al., 1994]. Наиболее низким порогом обладает электростатическая ионно-циклотронная неустойчивость, приводящая к возбуждению колебаний с поперечными масштабами порядка ионно-циклотронного радиуса. На ионосферном спутнике эти мелкомасштабные колебания будут зарегистрированы в виде всплеска

электростатических шумов на частотах ~200 Гц. Хотя пятно электростатических шумов будет медленно расплываться и ослабевать из-за амбиполярной диффузии, его время жизни оказывается больше, чем у альвеновского импульса. Рассмотренный сценарий подтвердился при наблюдениях ионосферных эффектов от подземных ядерных взрывов на спутнике DE-2 [Гохберг и др., 1990].

Индукцируемые акустической волной взрыва или землетрясения в ионосфере токи возбуждают распространяющиеся вдоль ионосферы специфические МГД волны, так называемые гиротропные волны, с характерными скоростями порядка первых километров в секунду, между звуковой и альвеновской [Сурков и др., 1997; Fedorov et al., 1999]. Специфические магнитные сигналы, соответствующие этому механизму, наблюдались после сильных землетрясений на магнитных станциях в Центральной Америке [Голиков и др., 1985].

Квазипериодические крупномасштабные электромагнитные возмущения, порождаемые акустическими волнами от интенсивных метеоявлений, резонансным образом воздействуют на дрейфующие вокруг Земли высокоэнергичные электроны внутреннего радиационного пояса, что приводит к их ускорению и дрейфу внутрь (своеобразный “геосинхротрон”) [Pokhotelov et al., 1999]. В последнее время геосинхротронный механизм широко используют для интерпретации ускорения геомагнитными пульсациями релятивистских электронов – “убийц” спутников во время магнитных бурь.

Продукты сгорания от факела ракетного двигателя в нижних слоях ионосферы подобно снежному плугу сгребают плазму и генерируют интенсивные токи и широкополосные гидромагнитные шумы. Часть этих шумов, с частотами более 1 Гц, захватывается в ионосферный магнитозвуковой волновод и распространяется на значительные расстояния от места старта. Такие возмущения наблюдались на сети индукционных магнитометров в Финляндии после запусков стратегических ракет на полигоне Плесецк.

Землетрясения

Сейсмоэлектромагнитные явления служат чувствительным индикатором процессов развития землетрясений. Поскольку электромагнитные возмущения распространяются на значительные расстояния от источника и легко детектируются, они могут эффективно использоваться для разработки дополнительных несейсмических методов прогноза землетрясений.

Частотно-зависимое ослабление электромагнитных возмущений в проводящей земной коре обуславливает два возможных диапазона наблюдений [Surkov, Pilipenko, 1999]:

- ОНЧ (VLF) излучения с частотами от сотен Гц до первых МГц, источники которого могут находиться в поверхностных слоях коры и связаны с микрорастрескиванием породы;
- СНЧ (ULF) возмущения с характерными частотами от мГц до Гц, источники которых находятся в области очага готовящегося землетрясения и обусловлены нестационарным флуктуирующим течением поровой жидкости сквозь растрескивающуюся породу [Fedorov et al., 2001].

В обоих частотных диапазонах были получены обнадеживающие результаты, указывающие на появление аномальных шумов и импульсов за часы–дни до отдельных сейсмических событий [Pilipenko et al., 1999d; Yagova et al., 2002b].

Зона подготовки сильного землетрясения может иметь характерные размеры порядка сотен и тысяч километров. Крупномасштабный характер возможных аномалий может помочь их обнаружению дистанционными наблюдениями за состоянием ионосферы Земли. По существу, ионосферу можно представлять как пленку легко подвижной плазмы на удалении ~100 км от земной поверхности, чутко реагирующую на крупномасштабные приземные возмущения даже небольшой амплитуды. При этом мелкомасштабные и нескоррелированные флуктуации быстро ослабевают с высотой. Непосредственным агентом переноса возмущений на ионосферные высоты могут быть квазистационарные электрические поля [Гохберг и др., 1985; Гошджанов и др., 1991] и акусто-гравитационные атмосферные волны (АГВ) с периодами более 5 минут [Pilipenko et al., 2001c]. 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 и электромагнитные шумы могут быть зафиксированы низколетящими спутниками и наземными установками зондирования ионосферы. Пионерские работы по поиску сейсмоионосферных связей по ионосферным [Fishkova et al., 1985] и спутниковым [Гохберг и др., 1982, 1983] данным к настоящему времени вызвали подлинный бум среди российских и зарубежных космических центров (ИКИ, ИЗМИРАН, ESA, NASDA).

Возможность обнаружения сейсмоэлектромагнитных излучений зависит от уровня естественного или промышленного фона перед сейсмическим событием, параметров земной коры и очага конкретного события. Поэтому, несмотря на наличие ряда убедительных эффектов, стандартная статистика, как правило, показывает низкую достоверность отдельного сейсмоэлектромагнитного явления. Для построения

реальной прогностической системы требуется разработка нового, “кибернетического”, подхода – “построение надежного целого из ненадежных компонентов”, включающего весь комплекс наблюдений геофизических полей разных частотных диапазонов.

Взаимодействие в системе литосфера–атмосфера–ионосфера представляет интерес как пример взаимодействия между различными геофизическими оболочками. Эффекты этого взаимодействия проявляются только при специфических условиях, при квазистационарном, но неравновесном состоянии ионосферы, когда малое внешнее воздействие высвобождает ранее накопленную энергию [Popov *et al.*, 1989]. Подобные эффекты триггерного характера необходимо исследовать, однако их нельзя положить в основу практической системы прогноза землетрясений с жесткими требованиями к уровню пропусков цели и ложных тревог. Поэтому попытки предложить спутниковые или ионосферные системы прогноза землетрясений явно необоснованны. Кроме того, не исключено, что в процессе технического развития проблема прогноза момента землетрясения потеряет свою остроту и актуальность (подобно тому как с появлением спутниковых GPS систем высокоточная магнитная съемка потеряла значение для целей навигации), так как современные строительные технологии позволяют возводить сооружения, практически не подверженные воздействию землетрясений.

Заключение

СНЧ электромагнитные поля являются эффективным средством для слежения за процессами в различных геофизических средах: магнитосфере, ионосфере, атмосфере и литосфере. Излучения СНЧ диапазона сопровождают все энергетически мощные геофизические процессы и служат одним из методов их диагностики и мониторинга. Исследования нетривиального эффекта резонансной трансформации МГД колебаний привели к созданию надежно обоснованных наземных методов гидромагнитной диагностики магнитосферы по данным СНЧ волн. При этом, измерения пульсаций оказываются надежным средством наземной диагностики плотности плазмы и на низких широтах, где стандартный метод диагностики с использованием спутников или наблюдений ОНЧ сигналов становится неэффективным. Оптимальным образом для гидромагнитной спектроскопии необходимо сочетание станций с малыми (~100–200 км) базами, позволяющими выделить локальные резонансные частоты, и большими (~ 1000 км) базами, необходимыми для определения глобальной структуры СНЧ волн. Данные мониторинга резонансных частот также позволяют уменьшить возможность ложной интерпретации МТЗ данных.

СНЧ излучения могут эффективно возбуждаться и при искусственном воздействии на геофизические среды (при взрывах, запусках ракет и т.п.). Многолетний опыт изучения естественных сигналов и излучений позволил приступить к решению проблемы обнаружения аномальных электромагнитных возмущений, связанных с сейсмической активностью, генерируемых в процессе разрушения горной породы за недели–часы до землетрясения.

Однако потенциальные возможности СНЧ 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. 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”.