

## К ВОПРОСУ АКУСТО-ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Назарчук З. Т.<sup>1</sup>, Кошевой В. В.<sup>1</sup>, Сорока С. А.<sup>2</sup>, Ивантишин О. Л.<sup>1</sup>,  
Лозинский А. Б.<sup>1</sup>, Романишин И. М.<sup>1</sup>

*1 Физико-механический институт НАН Украины, Львов*

*2 Львовский центр Института космических исследований НАНУ и НКАУ, Львов*

Приведены результаты экспериментальных исследований ионосферного отклика на искусственное акустическое возбуждение. Акустическое возбуждение генерируется при помощи наземного управляемого акустического излучателя. Регистрация ионосферного отклика проводится при помощи радиотелескопа УРАН-3 тремя методами: просвечивания, рассеяния на неоднородностях и наклонного зондирования. Для обработки данных используются методы вейвлет-анализа.

Много физических явлений естественного и техногенного происхождения (землетрясения, вулканы, мощные взрывы, старты ракет и др.) сопровождаются генерацией электромагнитных и акусто-гравитационных волн, которые распространяются к ионосферным высотам и порождают ионосферные возмущения. Ионосферные возмущения могут длиться продолжительное время и распространяться на значительные расстояния. Ионосфера при этом выступает как запоминающая среда с усиливающими и фильтрующими свойствами. Выявляя ионосферные возмущения и анализируя их параметры, можно делать выводы об источниках их возникновения, а следовательно, попытаться заблаговременно предсказывать землетрясения и регистрировать взрывы, старты ракет и тому подобное. Следует отметить, что в литосфере выявления этих явлений — источников ионосферных возмущений (например, взрывов и тому подобное) может быть затруднено из-за большой зашумленности, отдаленности и других причин. Поэтому исследование литосферно-ионосферной связи является актуальной проблемой.

Проблема исследования литосферно-ионосферных связей включает ряд задач. Среди них:

- исследование ионосферного отклика на естественные явления, такие как землетрясения, вулканы, цунами, с целью установления ионосферных предвестников этих естественных явлений;
- исследование ионосферного отклика на явления техногенного происхождения — взрывы [1], старты ракет — с целью разработки систем регистрации несанкционированных взрывов, запусков ракет и т.д.;
- исследование ионосферного отклика на управляемое электромагнитное возбуждение (нагревной стелды типа СУРА);
- исследование ионосферного отклика на управляемое акустическое возбуждение.

Следует отметить, что активные эксперименты по исследованию влияния акустического возбуждения на ионосферу до последнего времени были затруднены из-за отсутствия наземных управляемых источников акустических возмущений. Продолжается разработка управляемых акустических источников типа мощных сейсмодвибраторов [2].

Интересно, что ряд ключевых вопросов литосферно-ионосферных связей является дискуссионными. Среди них и вопрос механизмов формирования ионосферных возмущений под воздействием литосферных факторов (например, накануне землетрясения). Так, Гохбергом и Шалимовым [3] на основании сопоставления результатов статистической обработки данных по вертикальному зондированию ионосферы и фотометрических наблюдений за свечением кислорода в линиях 557.7 нм и 630 нм обосновывается гипотеза о механизме внутренних гравитационных волн передачи возмущений накануне землетрясений. Здесь же анализируется гипотеза инфразвукового и электромагнитного каналов передачи возмущений.

В общем следует отметить следующие тенденции в развитии исследований литосферно-ионосферных связей.

Во-первых, новую эру в дистанционной диагностике ионосферы открывает развитие глобальной навигационной системы GPS и создания на ее основе широко разветвленной сетки станций GPS, которая на август 2001 г. насчитывает не меньше 900 пунктов, данные которых поставляются в Internet [4]. При помощи двухчастотных многоканальных приемников системы GPS практически в любой точке земного шара и в любое время одновременно на двух когерентно-связанных частотах  $f_1 = 1575.42$  МГц и  $f_2 = 1227.60$  МГц осуществляются высокоточные измерения группового и фазового опоздания на луче зрения между приемником на земной поверхности и передатчиками на ИСЗ, который находится в зоне приема. Чувствительность фазовых измерений в системе GPS позволяет детектировать неоднородности с амплитудой до  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  от суточного изменения полного электронного содержания. Разработаны методики обработки GPS-данных о полном электронном содержании и на основе этого Афраймовичем и др. проведены исследования ударно-акустических волн, которые генерируются при запусках ракет, промышленных взрывах, подземных ядерных испытаниях и землетрясениях [5].

Параметры ударно-акустических волн (фазовую скорость, угловые характеристики волнового вектора, направление на источник и его положение) определяют на основе фазовых измерений полного электронного содержания на нескольких разнесенных в пространстве двухчастотных приемниках GPS. Отмечаются следующие преимущества такого подхода [5]:

- высокое временное разрешение и высокая точность фазовых измерений в системе GPS дает возможность фиксировать достаточно слабые (с амплитудой до  $10^{-4}$  от суточного изменения полного электронного содержания) и кратковременные (до 5 мин) возмущение ионизации;
- возможность определения параметров ударно-акустических волн без априорных сведений о месте и времени события (запуски ракет, взрывы, землетрясения);
- возможность определять не только горизонтальную составляющую скорости ударно-акустических волн, но также рассчитывать угол места волнового вектора и модуль скорости;

- знание полного вектора скорости ударно-акустических волн позволяет с хорошей точностью определять направление на источник и его положение.

Отмечаются следующие результаты наблюдений ударно-акустических волн, которые генерируются во время взрывов [5]:

- ионосферный отклик ударно-акустической волны для взрыва носит характер N-волны, соответствующий классической форме ударной волны;
- период ионосферного отклика ударно-акустической волны составляет 180 с, а амплитуда (0.3 полного электронного содержания) превышает уровень фоновых флуктуаций как минимум в 2 раза;
- параметры вариаций полного электронного содержания, которые наблюдаются во время взрыва, близки к тем же характеристикам возмущений полного электронного содержания, которые детектируются во время запусков ракет и землетрясений.

Результаты наблюдений ударно-акустических волн, которые генерируются во время землетрясений, следующие [5]:

- независимо от характеристик землетрясений, местного времени, сезона и уровня магнитной активности ионосферный отклик ударно-акустических волн для всех землетрясений носит характер N-волны, соответствующий классической форме ударной волны;
- период ионосферного отклика ударно-акустических волн составляет 180-390 с, а амплитуда (0.06-0.5 полного электронного содержания) превышает уровень фоновых флуктуаций в умеренных геомагнитных условиях как минимум в 2 раза;
- азимут перемещения ударно-акустических волн в большинстве случаев совпадает с направлением на эпицентр землетрясения;
- угол места волнового вектора возмущения изменяется в границах 20-440, а фазовая скорость (1100-1300 м/с) близка к скорости звука на высотах максимума F-области ионосферы. Это позволяет сделать вывод о звуковой природе данного возмущения полного электронного содержания;
- положение источника, рассчитанное без учета рефракционных поправок, приблизительно отвечает эпицентру землетрясения. Задержка времени включения источника ударно-акустических волн относительно момента старта варьируется от 7 до 110 с;
- форма, амплитуда, период ионосферного отклика ударно-акустических волн, что наблюдаются при землетрясениях, а также рассчитанные параметры скорости близки к тем же характеристикам ионосферного отклика ударно-акустических волн, которые генерируются во время запусков ракет.

Результаты наблюдений ударно-акустических волн, которые генерируются при запуске ракет [5]:

- независимо от характеристик ракеты, местного времени, сезона и уровня магнитной активности ионосферный отклик ударно-акустических волн для всех за-

пусков носит характер N-волны, соответствующий классической форме ударной волны;

- период ионосферного отклика ударно-акустических волн составляет 270-360 с, а амплитуда (0.1-0.5 полного электронного содержания) превышает уровень фоновых флуктуаций в умеренных геомагнитных условиях как минимум в 2-5 раз;
- азимут перемещения ударно-акустических волн практически совпадает с азимут нормализации к горизонтальной проекции траектории движения ракет;
- угол места волнового вектора возмущения изменяется в границах  $35-60^{\circ}$ , а фазовая скорость (800-1200 м/с) близка к скорости звука на высотах максимума F-области ионосферы. Это позволяет сделать вывод о звуковой природе данного возмущения полного электронного содержания.

Следующая тенденция в развитии исследований литосферно-ионосферных связей связана с тем, что для регистрации и анализа крупномасштабных пространственных изменений и аномалий ионосферной плазмы все чаще применяются томографические методы [6]. Для обработки экспериментальных ионосферных данных все шире применяются современные методы вейвлет-анализа [7].

Наши исследования направлены на экспериментальную регистрацию и анализ ионосферного отклика на управляемое акустическое возбуждение. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Акустическое возбуждение генерируется при помощи наземного управляемого акустического излучателя. Наземный акустический излучатель состоит из двух генераторов, которые генерируют акустические волны близкой (но различной!) частоты в окрестности 100 Гц. Предусматривается, что ионосферных высот достигают инфразвуковые составляющие (1 Гц и ниже), которые образуются за счет нелинейного параметрического эффекта в атмосфере при взаимодействии двух акустических волн различной частоты.

Для экспериментального исследования влияния на ионосферу искусственного акустического возмущения применяется радиотелескоп декаметрового диапазона УРАН-3.

Радиопередатчик, акустический излучатель и радиотелескоп находились на одном меридиане, что должно усиливать ожидаемые эффекты взаимодействия акустических волн с ионосферой.

Проводились эксперименты тремя радиофизическими методами: на просвет, методом рассеивания и методом наклонного зондирования.

Наиболее убедительные результаты относительно ионосферного отклика на управляемое акустическое возбуждение получены методом рассеивания.

Акустическое возмущение должно приводить к появлению доплеровского сдвига в спектре рассеянного ионосферного сигнала. Время появления доплеровского сдвига коррелирует с моментом акустического возбуждения. Этот эффект зафиксирован. Ве-

личина сдвига составляла 7 Гц, время появления - через 6 мин 23 с после акустического возбуждения, которое согласовывается с расчетным временем распространения акустического возбуждения к ионосфере.

Выделять такие эффекты путем обработки зарегистрированных сигналов можно различными методами. Среди них оконное преобразование Фурье, вейвлет-анализ.

Приведем результаты наблюдений тремя названными методами на основании обработки экспериментально зарегистрированного сигнала при помощи непрерывного вейвлет-преобразования (wavelet Morlet).

В основе вейвлет-анализа лежит разложение сигнала по специальным базисным функциям-всплескам (wavelet), главные особенности которых – компактная локализация по времени и масштабу, самоподобие. Компактная локализация по времени позволяет при обработке сигналов фиксировать времена появления выбросов, анализировать динамику нестационарных процессов.

В вейвлет-анализе основной является проблема выбора наиболее подходящего вейвлета, который должен принадлежать такому же классу функций, что и искомый сигнал.

Таким образом, преобразование ставит в соответствие одномерному сигналу двумерное изображение в координатах время-масштаб. К такому представлению можно подходить как к изображению со всеми средствами его обработки (фильтрации, распознавания, сжатия и др.). Значение амплитуды вейвлет-преобразования в точке  $(a, b)$  тем больше (по абсолютной величине), чем сильнее корреляция между вейвлетом данного масштаба  $a$  и поведением сигнала в окрестности  $t=b$ . Это позволяет фиксировать время появления выбросов сигнала, определять характерные времена и масштабы процессов, а при различии последних – разделять их. Данное обстоятельство особенно важно в случае, когда исследуемый сигнал является суперпозицией ряда нестационарных процессов, обусловленных несколькими факторами с разными характерными временами и масштабами.

На рис. 2 приведена реализация рассеянного ионосферного сигнала на третьей промежуточной частоте 3 Гц и изображение его вейвлет-коэффициентов. Здесь четко просматривается участок после акустического возбуждения, который характеризуется изменением сигнала в широком диапазоне частот и свидетельствует о том, что “в ионосфере изменилась ситуация”. На рис. 2 можно выделить тоже область, которая соответствует промежуточной частоте 3 Гц, и доплеровский сдвиг 7 Гц из-за движения неоднородности (в момент прохождения акустического сигнала через область рассеивания). Отметим, что при известном ожидаемом эффекте (например, при доплеровском сдвиге) путем подбора наиболее подходящего вейвлета можно определять форму ионосферного отклика на возмущение ионосферной плазмы.

Другой эксперимент - радиометрические записи методом просвечивания (рис. 3). Радиотелескоп настраивается на наблюдение определенного источника (3С348) и ведется его запись. Здесь мы видим 20-минутные реализации, которые прописывают диа-

грамму направленности телескопа (рис. 3). Кроме пятиминутного отклика, через 20 мин после акустического возмущения наблюдались возмущения, что свидетельствует о наличии нестационарного процесса.

Еще один эксперимент — тоже радиометрические записи методом просвечивания. Радиотелескоп настраивался на группу источников, интенсивность излучения которых малая, и они не позволяли в нормальных условиях прописывать диаграмму направленности (рис. 4). Ожидался рост сигнала от влияния ионосферных неоднородностей. Как видно из рисунка, наблюдается быстрая реакция через 5 мин после акустического возбуждения (в момент прохождения акустической волны через ионосферу), повторная реакция через 20 мин и вторая повторная реакция через 40 мин.

Отметим, что подобные эффекты «ионосферной линзы», связанные с увеличением сигнала, наблюдались и во время активных литосферно-ионосферных экспериментов при нагревании ионосферы электромагнитным излучением. В данное время эти эффекты относят к «слабо изученным», ведутся дискуссии и разрабатываются гипотезы объяснения их (к этому направлению исследований имеет отношение работа [8]).

На рис. 5 приведены результаты наклонного зондирования. Обработывалось около 30 тыс. отсчетов, что отвечало 15-минутной реализации. Метод слабочувствительный, ибо слабые изменения, обусловленные акустикой, необходимо регистрировать на фоне интенсивного отраженного сигнала. На изображении вейвлет-коэффициентов наблюдается третья промежуточная частота 3 Гц, а также квазипериодические вариации смещения частоты через 20 мин после акустического возбуждения.

Таким образом, ионосферный отклик на наземное искусственное акустическое возбуждение состоит из нескольких компонентов, которые проявляются на седьмой минуте, а также через 20 и 40 минут после акустического возбуждения. Отметим, что кроме перечисленных компонентов зарегистрирован отклик на первой минуте (через 20-30 секунд) после возбуждения.

Далее планируются следующие исследования:

1. Измерение параметров акустического поля на поверхности Земли и оценка инфразвуковой обстановки при акустическом возбуждении.
2. Разработка на базе радиотелескопа УРАН-3 системы мониторинга ионосферы с целью восстановления инфразвуковой обстановки на поверхности Земли.
3. Апробация системы путем проведения натурального эксперимента по восстановлению инфразвуковой обстановки на поверхности Земли и сравнения с записями, которые ведутся штатными станциями.

Работа выполняется в рамках проекта НТЦУ №1681 и нацелена на разработку информационных технологий обработки ионосферных сигналов для целей обнаружения и идентификации слабых акусто-ионосферных возмущений и восстановления инфразвуковой обстановки на поверхности Земли.

1. Физика Земли // Тематический выпуск, посвященный проекту МАССА. – 1985, № 11. – 112 с.
2. Гуляев В. Т. и др. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмодвижителей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2001, т.37, №3. – С.303-312.
3. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журнал наук о Земле. – 2000, т.2, №2. <http://eos.wdcb.ru/rjes/v02/rje00032/rje00032.htm>.
4. Ионосферный отклик полных солнечных затмений 9 марта 1997 г., 11 августа 1999 г., 21 июня 2001 г. // <http://rp.iszf.irk.ru/esceir/gps/ECLIPSES/rus/tseInt.htm>.
5. Исследование ударно-акустических волн, генерируемых при взрывах, землетрясениях и запусках ракет // <http://rp.iszf.irk.ru/esceir/gps/SAWDET/rus/sawdet.html>.
6. Андреева Е. С., Гохберг М. Б., Куницын В. Е. и др. Радиотомографическая регистрация возмущений ионосферы от наземных взрывов // Космические исследования. - 2001, т.39, №1. - С.13-17.
7. Иванов В. В. и др. Применение вейвлет-анализа к исследованию геомагнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. - 2001, т.41, №5. - С.610-618.
8. Блиох В. П. СДВ “эльфы” как рассеивающие линзы в волноводе Земля-ионосфера // Радиофизика и радиоастрономия. - 2000, т.5, №2. - С.113-117.

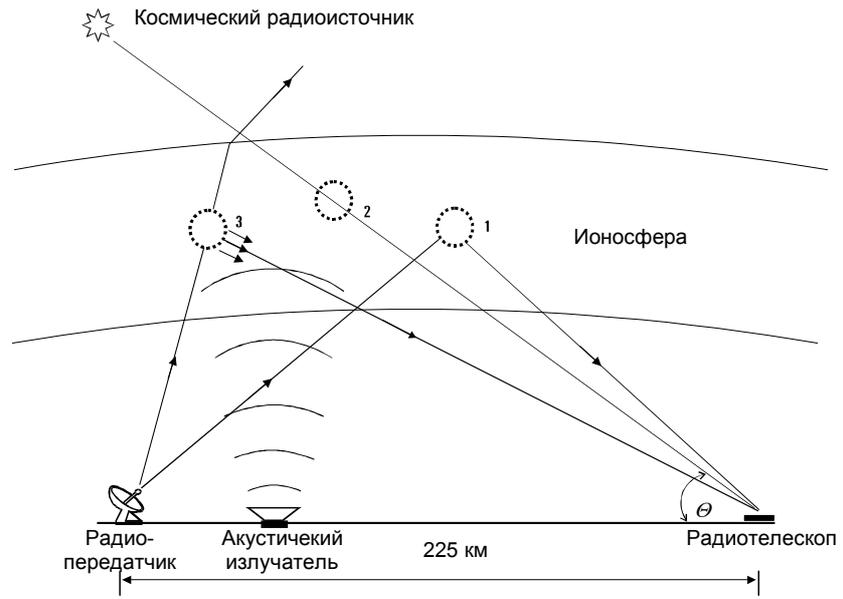


Рис. 1. Схема эксперимента

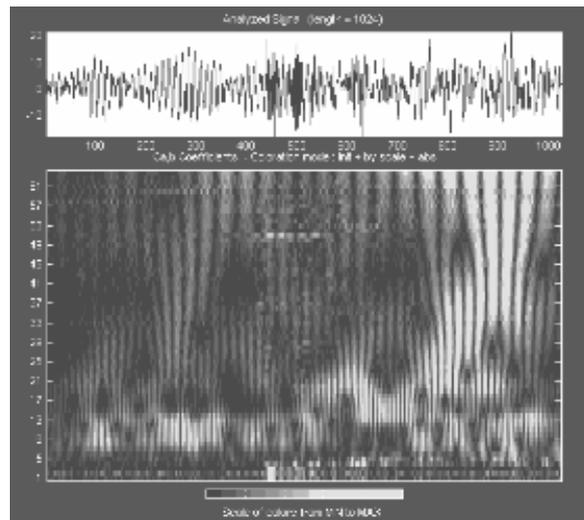


Рис. 2. Реализация рассеянного ионосферного сигнала на 3-й промежуточной частоте 3 Гц и его вейвлет-коэффициенты

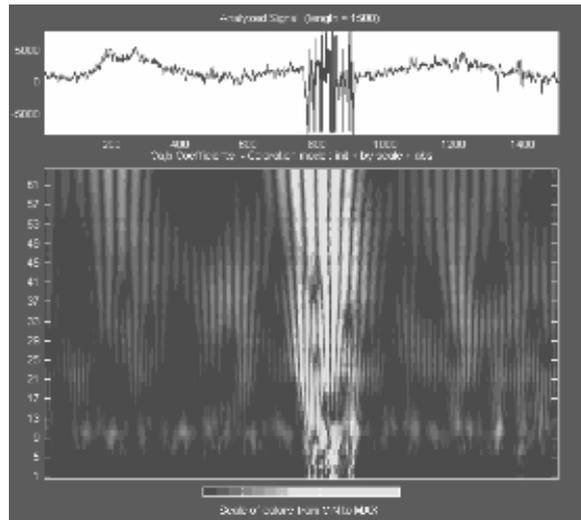


Рис. 3. Радиометрические записи методом просвечивания источника (3C348)

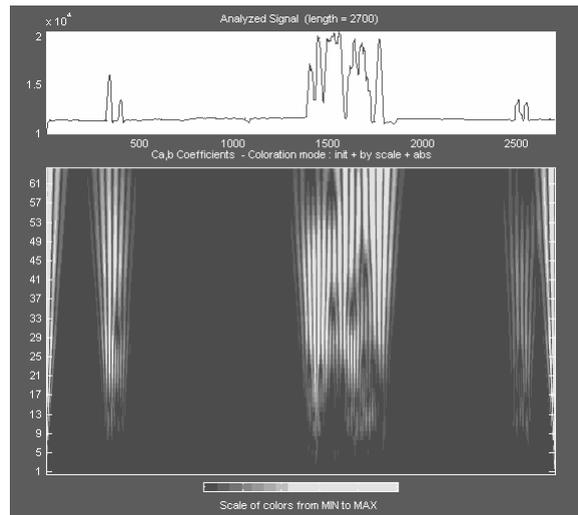


Рис. 4. Радиометрические записи методом просвечивания группы источников

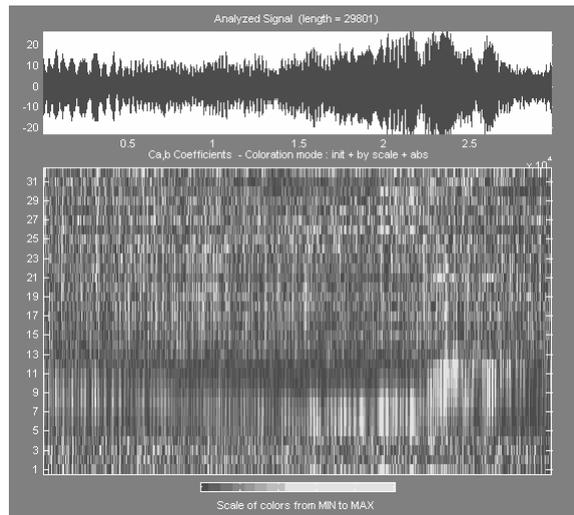


Рис. 5. Результаты наклонного зондирования