

УДК 550.388.2+520.6.05+534-6+520.27

О. К. Черемных<sup>1</sup>, С. И. Климов<sup>2</sup>, В. Е. Корепанов<sup>3</sup>, В. В. Кошовый<sup>4</sup>, М. Е. Мельник<sup>3</sup>,  
О. Л. Ивантишин<sup>4</sup>, В. П. Мезенцев<sup>3</sup>, Р. Т. Ногац<sup>3</sup>, Ю. Г. Рапорт<sup>5,1</sup>, Ю. А. Селиванов<sup>1</sup>, Л. П. Семенов<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований Национальной академии наук Украины  
та Державного космічного агентства України, Київ

<sup>2</sup> Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> Львовский центр Института космических исследований Национальной академии наук Украины  
та Державного космічного агентства України, Львів

<sup>4</sup> Физико-механический институт имени Г. В. Карпенка Национальной академии наук Украины, Львів

<sup>5</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

<sup>6</sup> Державне космічне агентство України, Київ

## НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИСКУССТВЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

---

*Наземно-космический эксперимент по исследованию влияния искусственных акустических возмущений на ионосферу проведен 28 ноября 2013 г. В эксперименте были задействованы микроспутник «Чибис-М» (ИКИ РАН), мощный стационарный акустический излучатель (ЛЦ ИКИ НАНУ-ГКАУ) и декаметровый радиотелескоп УРАН-3 (ФМИ НАНУ). В ходе эксперимента было проведено пять сеансов регистрации вариаций магнитных и электрических полей на борту спутника в моменты пролета вблизи точки расположения акустического излучателя. Одновременно с помощью радиотелескопа выполнялись наблюдения за изменением радиопрозрачности ионосферы над местоположением излучателя. Представлены результаты обработки данных измерений.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Международный космический эксперимент «ЛИНК-Чибис» был выполнен научными коллективами Украины и России для исследования отклика ионосферы на низкочастотное акустическое (НЧА) излучение, генерируемое наземным управляемым акустическим (НУА) излучателем.

Научной задачей эксперимента являлось получение экспериментальной информации о явлениях, возникающих при распространении от поверхности Земли и взаимодействии с атмосферными и ионосферными слоями низкочастотного акустического излучения со специальной амплитудной модуляцией. Отличительной особенностью проведенного эксперимента

является его комплексность: с одной стороны, НУА-излучатель обеспечивает управляемую генерацию акустического поля НЧА-излучения за счет излучения двух смещенных по частоте акустических волн с низкочастотной амплитудной модуляцией и их нелинейного взаимодействия в нижней атмосфере [2, 4, 6, 8, 32]; с другой стороны, проводилась синхронизированная во времени регистрация параметров электромагнитных полей в определенных частотных диапазонах с целью поиска реакции ионосферы на акустическое возбуждение.

С 1963 г., когда в Государственный реестр открытий СССР внесено под № 128 с приоритетом от 25 сентября 1963 г. открытие А. В. Таранцева и Я. Г. Бирфельда в следующей формулировке: «Установлено неизвестное ранее явление возникновения ионосферных возмущений, наиболее сильных в полярных областях, обусловленное воздействием акустических волн, возникающих в атмосфере Земли в результате землетрясений,

---

© О. К. ЧЕРЕМНЫХ, С. И. КЛИМОВ, В. Е. КОРЕПАНОВ,  
В. В. КОШОВЫЙ, М. Е. МЕЛЬНИК, О. Л. ИВАНТИШИН,  
В. П. МЕЗЕНЦЕВ, Р. Т. НОГАЦ, Ю. Г. РАПОРТ,  
Ю. А. СЕЛИВАНОВ, Л. П. СЕМЕНОВ, 2014

вулканических извержений, подземных, приземных и воздушных взрывов», нет сомнений в возможности акустического воздействия на ионосферу. Однако остается открытым вопрос о минимальной мощности наземного источника, при которой еще реализуется такое воздействие.

В настоящее время дистанционный мониторинг природной среды невозможен без систематических наблюдений атмосферных волн НЧА-излучения (преимущественно в инфразвуковом диапазоне), которые могут выступать в качестве полезного сигнала при диагностике природных систем [14, 30] или же в качестве помехи, влияющей на сигналы от дистанционно контролируемых технических объектов [1, 8, 18]. Важно отметить экспериментальное обнаружение с орбитальных космических аппаратов (КА) [11, 20, 22] НЧА-излучения, порожденного очагами готовящихся землетрясений: так, инфразвук, генерированный растрескиванием горных пород в областях подготовки землетрясений, сейчас рассматривается как один из возможных их предвестников. В тех случаях, когда удавалось вовремя провести спутниковые измерения, были зафиксированы ионосферные возмущения на частотах таких волн.

Установлено, например, в эксперименте МАС-СА (изучение магнитосферно-атмосферных связей при сейсмо-активных явлениях, 1981 г.) [22], что ионосферные возмущения, вызываемые НЧА-излучением от наземных взрывов, трансформируясь в плазменные волны различных типов и ионосферные вихри, распространяются на значительные расстояния и делятся долгое время. Этот процесс сопровождается целой гаммой других эффектов, которые, с одной стороны, поддаются дистанционной диагностике, в частности наземными и космическими средствами, а с другой — отображают природу возбуждающего акустического поля и информацию о его источнике [1, 19, 20, 31, 33, 38].

При систематизации и детальном изучении таких эффектов можно будет диагностировать состояние ионосферной плазмы по ее реакции на акустическое возбуждение, и даже, при наличии достаточно мощных управляемых источников акустических полей, целенаправленно влиять на

состояние ионосферы [6, 11]. При этом, как и в задачах высокочастотного радионагрева ионосферы, необходимо решить сложную проблему доставки в ионосферу достаточного количества механической энергии в форме низкочастотных акустических колебаний.

Корректное решение проблемы обнаружения и идентификации ионосферных возмущений акустического типа естественного и искусственного происхождения, а на их основе и источников звука на поверхности Земли, требует знаний о закономерностях влияния на ионосферу источников возмущений различной природы, в том числе и акустических.

Для исследования этой проблемы в основном используются явления естественного происхождения. Среди ученых, внесших вклад в исследование литосферно-ионосферных связей при сейсмоакустических явлениях: М. Б. Гохберг, В. А. Липеровский (Институт физики Земли РАН, Россия), Э. Л. Афраймович (Институт Солнечно-земной физики, Россия), В. И. Ларкина (ИЗМИРАН, Россия), М. Hayakawa (University of Electro-Communication, Japan), М. Parrot (LPCE/CNRS, France), N. Blaunstein (Ben-Gurion University of the Negev, Israel), Н. Я. Коцаренко (Киевский национальный университет им. Т. Г. Шевченко), Л. Ф. Черногор (Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Украина), В. М. Краснов (Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Россия).

Приближенная теория «просветления ионосферы» для радиоволн под влиянием излучения звукового генератора, включающая параметрическое преобразование двух акустических волн с частотами порядка 600 и 625 Гц в разностную частоту порядка 25 Гц построена в работе [32], а возможность проникновения акустических волн на частоте порядка разностной частоты из нижней атмосферы в ионосферу и соответствующего измеримого ионосферного отклика в линейном приближении приведена в работе [39].

Для изучения влияния акустических полей на ионосферу использовались, как правило, мощные взрывы. В это направление исследований внесли свой вклад такие ученые, как А. R. Jacobson, R. C. Carlos, T. J. Fitzgerald (Los Alamos Na-

tional Laboratory, USA), E. Blanc (Laboratory of Detection of Geophysics, France), П. М. Нагорский, (Сибирский Физико-Технический институт, Россия), В. И. Дробжев (Институт ионосферы МОН РК, Казахстан), М. Б. Гохберг (Институт физики Земли РАН, Россия), Ю. И. Гальперин (ИКИ РАН), Н. Я. Коцаренко (Киевский национальный университет им. Т. Г. Шевченко), М. Hayakawa (University of Electro-Communication, Japan), Л. Ф. Черногор (Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Украина), В. М. Краснов (Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Россия).

Однако из-за случайности и неуправляемости явлений естественного происхождения эффективность их использования как исследовательского инструмента низка, а проведение мощных наземных взрывов еще и связано с проблемами экологического характера.

С другой стороны, значительно менее мощные источники типа метеорологических акустических локаторов, дают информацию только о состоянии нижней атмосферы.

Значит, как и было упомянуто выше, открытыми остаются такие важные вопросы, как определение нижней границы мощности источника, достаточной для получения проявленной (измеримой) реакции ионосферы, а также определение градации проявления эффектов в различных временных и пространственных масштабах при возрастании мощности источника звука. Для решения таких задач актуально использование установок типа НУА-излучателя.

Ниже кратко описаны основные моменты подготовки, проведения и представлены результаты обработки данных наземно-космического активного эксперимента, в котором были задействованы акустический излучатель Львовского центра Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины (ЛЦ ИКИ НАНУ-ГКАУ), микроспутник (МС) «Чибис-М» Института космических исследований РАН и декаметровый радиотелескоп УРАН-3 Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины (ФМИ НАНУ). На данном этапе развития исследований нас интересовала прежде всего феноменология отклика ионосферы,

а не построение теории влияния на ионосферу с помощью наземного генератора. Это планируется сделать после анализа представленных здесь данных эксперимента в 2014—2015 гг. соответствующими подразделениями ИКИ НАНУ и ГКАУ, ИКИ РАН, ЛЦ ИКИ НАНУ-ГКАУ, ФМИ НАНУ.

#### ГЛАВНЫЕ НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА «ЛИНК-ЧИБИС»

Из экспериментов и численного моделирования известно, что при излучении низкочастотного акустического (например инфразвукового) сигнала в направлении, близком к вертикали, он уходит в верхние слои атмосферы, где претерпев ряд изменений, в конечном итоге поглощается. Теоретически оцененная предельная высота, которой достигает сигнал до поглощения, зависит от частоты волны, уменьшаясь с ее увеличением, и отличается для линейных (гармонических) и нелинейных волн [10]. Есть теоретические указания на то, что акустический сигнал асимптотически приобретает форму  $N$ -волны [13], параметры которой слабо зависят от условий излучения.

Явление проникновения НЧА-излучения в ионосферу нельзя считать достаточно полно изученным экспериментально по целому ряду причин. Во-первых, это трудность прямых наблюдений на всей трассе в атмосфере с переменными ветрами, наличием аэрозолей и изменчивой стратификацией, что заставляет вводить модельные предположения. Особенно это касается промежуточных высот в 40 — 70 км, т. е. ниже орбит спутников, но выше высот авиационных средств. Во-вторых, реальные акустические сигналы, как правило, представляют собой волновые пакеты с той или иной низкочастотной модуляцией и, часто, не являются синусоидальными. В-третьих, моделирование подъема пакета в верхние слои атмосферы с учетом нелинейных эффектов и диссипация, обязанных нарастанию колебательной скорости на фоне уменьшения плотности атмосферы, показывает очень сложную картину, зависящую от конкретных условий вблизи трассы. Наконец, в-четвертых, практически отсутствует экспериментальная основа

в виде источников НЧА-излучения требуемой мощности, с привлечением которых уже возможна постановка контролируемых экспериментов с активным акустическим воздействием на верхнюю атмосферу и ионосферу.

В реальном эксперименте, как правило, комбинируются несколько эффектов. Часто они зависят от процессов, которые, по тем или иным причинам, трудно учитывать или контролировать. Говорить о решении задачи идентификации отклика ионосферы в этих условиях возможно только на основе постановки одновременных измерений по разным каналам (и на разных высотах) и комплексного анализа соответствующих данных.

Суммируя ряд теоретических исследований, можно выделить несколько возможных механизмов протекания указанных явлений.

Во-первых, прямое достижение пакетом НЧА-излучения ионосферных высот с образованием соответствующего отклика ионосферной плазмы, что возможно при достаточно низких частотах и достаточной мощности [19, 33]. Этот механизм наблюдался экспериментально, например, в эксперименте МАССА [1] для ударных акустических волн. Моделированию распространения пакетов НЧА-излучения посвящены работы [27, 28], для синусоидальных волн с пространственно-ограниченным источником в работах [21, 40, 41] построена теория и проведено сравнение с экспериментальными данными. Анализ экспериментальных данных по акустоионосферным эффектам посвящены работы [2, 6, 32]. Ввиду стратификации атмосферы амплитуда акустических волн увеличивается с высотой [24, 26, 27]. Это вызывает генерацию (нелинейную) высших гармоник и ограничивает высоту, до которой возможно проникновение акустических волн [25, 27, 28]

Во-вторых, возможна трансформация пакета акустических волн в электромагнитные волны в ионосфере [13, 18, 33, 35, 36, 38], в том числе возбуждение альвеновских волн через посредство тока, генерируемого в  $E$ -области ионосферы [27], а также пространственно разнесенных структур нейтральной и заряженной составляющих анизотропной ионосферной области  $F$  неус-

тойчивой экваториальной плазмы [40]. Заметим, что спутники на относительно невысоких орбитах смогут регистрировать как альвеновские, так и магнитозвуковые волны, тогда как на высотах выше 600 км магнитозвуковые волны рассеиваются благодаря сильной дифракции, и остаются альвеновские волны, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля [25].

В-третьих, есть возможность модуляции акустической волной (вертикального) атмосферного тока, который в этом случае становится антенной, излучающей электромагнитные волны, достигающие ионосферных высот и трансформирующихся в ионосферной плазме в МГД-волны [16, 17, 22, 31].

Необходимо также отметить важную роль, которую могут играть в изучении вертикально распространяющегося НЧА-излучения горизонтальные (и наклонные) атмосферные волноводы. Поднимаясь до высоты этих волноводов, акустические волны могут возбуждать резонансные моды, распространяющиеся в них на значительные расстояния. Например, в работе [15] рассмотрен акустический волноводный слой вблизи высоты 75 км, а в работах [40, 41] — волновод для гидромагнитных волн с частотой, соответствующей инфразвуковым колебаниям, на высотах порядка 300 км.

Цель рассматриваемого эксперимента — с помощью бортовой научно-исследовательской аппаратуры МС «Чибис-М» и наземного радионавигационного комплекса УРАН-3 зафиксировать изменения характера вариаций магнитных и электрических полей, которые можно было бы интерпретировать как реакцию ионосферы на акустическое возмущение с поверхности Земли.

#### НАУЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ НА БОРТУ МИКРОСПУТНИКА «ЧИБИС-М»

Микроспутник «Чибис-М» своей целевой задачей имеет изучение физических процессов, связанных с атмосферными грозовыми разрядами. Для этой цели КА оснащен комплексом научной аппаратуры «Гроза», в состав которого входит магнитно-волновой комплекс для измерений в диапазоне частот от 0.1 Гц до 40 кГц (МВК) [12], состоящий из следующих устройств:

- индукционный магнитометр — LEM1-127 (ЛЦ ИКИ НАН и ГКА Украины);
- комбинированный волновой зонд — LEM1-603 (ЛЦ ИКИ НАН и ГКА Украины);
- процессор спектрального анализа — ПСА (Университет Этвеша, Венгрия).

Реализованная на борту МС конфигурация датчиков комплекса МВК позволяет провести векторные измерения магнитной и одной из электрических составляющих КНЧ-ОНЧ-излучений. В круг задач, решаемых по программе исследований «Чибис-М» [12], входило проведение активного эксперимента по акустическому воздействию на атмосферу и ионосферу во время пролёта «Чибис-М» над наземным стендом ЛЦ ИКИ (эксперимент «ЛИНК-Чибис»). Некоторые характеристики МВК приведены в табл. 1.

#### НАУЧНЫЕ УСТАНОВКИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА

Выбор составляющих наземного сегмента был обусловлен научными задачами эксперимента, разработанными ранее методиками измерений, имеющимся опытом участия исследователей в решении задач по акустическому воздействию на атмосферу, готовностью установок на период проведения эксперимента. В результате в состав наземного сегмента были включены следующие установки.

Наземный управляемый акустический (НУА) излучатель — ЛЦ ИКИ НАН и ГКА Украины (расположение: г. Львов, 49°47'56.52" N 24°00'34.31" E) [2, 4, 6]. Конструктивно установка состоит из камеры, в которой вращаются два ротора, и рупора. Генератором звука в используемом роторном акустическом излучателе является связанные с каждым из роторов тела, вращающиеся со сверхзвуковой скоростью. При этом в турбулен-

тном следе за движущимся телом генерируются акустические волны, а перед ним — слабые ударные волны (импульсы). При частоте следования импульсов в 600 Гц эффективная длина волны (расстояние между импульсами) составляет порядка 0.5 м. Из камеры с роторами импульсы поступают в вертикальный рупор длиной около 8 м. При уровне акустического давления на срезе рупора в 165 дБ амплитудное значение избыточного давления составляет примерно 3600 Па, что сравнимо с избыточным давлением в ударной волне сверхзвукового самолета и приводит к проявлению нелинейных эффектов. Суммируя, можно сказать, что роторный излучатель генерирует периодическую последовательность звуковых импульсов с ударными фронтами. Для обеспечения разумного компромисса между мощностью наземного источника (эффективность излучения выше при высоких частотах) и достижением волнами ионосферных высот (предельная высота подъема больше при низких частотах) была разработана схема, в которой начальная генерация производилась с частотами следования нелинейных волн (акустических импульсов) 600 и 624 Гц пакетами с длительностью 60 с с расстоянием между ними в 60 с, что соответствует амплитудной модуляции с частотой около 0.01 Гц. Дальше, согласно оценкам, на высотах нижней атмосферы, в области перекрытия двух нелинейных волн, должна была сформироваться «параметрическая антенна», излучающая вблизи разностной частоты (24 Гц) и практически с той же амплитудной модуляцией. При достижении волнами с частотами 600 и 624 Гц предельных для них высот они должны были распастись, причем вторичный комплекс (24 Гц с модуляцией около 0.01 Гц) должен был продолжить движение до высот распада несущей. Пос-

Таблица 1. Некоторые характеристики использованных в эксперименте датчиков МВК

Датчик	Число составляющих	Диапазон частот	Уровень шума
Магнитное поле ( $B_x, B_z, B_y$ )	3	10 Гц ... 40 кГц	$\leq 0.02$ пТл/Гц <sup>1/2</sup> при 1 кГц
Электрическое ОНЧ-поле ( $E = E_2 - E_1$ )	1	10 Гц... 40 кГц	$\leq 10^{-6}$ В/Гц <sup>1/2</sup> при 1 кГц
Постоянное магнитное поле ( $BM_x, BM_y, BM_z$ )	3	DC-100 Гц	$\leq 10$ пТл/Гц <sup>1/2</sup> при 1 Гц

ле этого, как показано в ряде работ, распространяется сигнал, по форме близкий к огибающей («атмосферное детектирование») [9, 10]. Этот сигнал согласно расчетам на основании модели MSISE2000 должен достичь ионосферных высот примерно через 4.5 мин после начала генерации. Такая схема во многом напоминает ставшую классической схему ВЧ-радионагрева ионосферы, в свое время предложенную Г. Г. Гетманцевым, за тем исключением, что начальный этап (этап генерации) в нашем случае по необходимости сделан двухстадийным.

Показано, что при средней длительности работы НУА-излучателя в 60 с общая излученная акустическая энергия на четыре порядка меньше, чем энергия, выделившаяся на земле при взрыве в эксперименте МАССА (230 т тринитротолуола). Однако в данной установке возможно устанавливать различную длительность пакетов, интервалы между ними и их количество (длительность сеанса воздействия).

**Радиотелескоп УРАН-3 — ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины** (расположен возле г. Шацк Волынской области в 200 км на север от Львова). Специалистами Физико-механического института имени Г. В. Карпенко НАН Украины на базе декаметрового радиотелескопа УРАН-3 создан информационно-измерительный комплекс (ИИК), предназначенный для дистанционного радиозондирования искусственных акустико-ионосферных возмущений [3, 5].

Информационно-измерительный комплекс позволяет проводить исследования состояния ионосферы на основе нескольких радиофизических методов, а именно: радиоастрономического метода с использованием в качестве зондирующего радиоизлучения космических радиоисточников, метода наклонного радиозондирования ионосферы и метода рассеяния радиоволн на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях с использованием в качестве зондирующих сигналов станций радиовещания или специальных станций. Каждый из методов использует как информационные соответственно следующие сигналы: прошедший через ионосферу, отраженный от ионосферы и рассеянный ионосферой. Совместное использование

нескольких методов, в которых используются информационные радиосигналы, сформированные на основе разных механизмов акустической стимуляции электромагнитных эффектов в ионосферной плазме, повышает достоверность выявления и идентификации слабых акустических ионосферных возмущений. При этом наблюдения могут проводиться в одном из трех режимов:

- измерения и исследования характеристик отраженных ионосферных радиосигналов в зависимости от угла места;
- измерения и исследования амплитудных и поляризационных характеристик, а также доплеровской частоты отраженных или рассеянных радиосигналов;
- радиоинтерферометрические исследования прошедшего через ионосферу космического радиоизлучения.

Экспериментально установлено, что реализованные на основе разработанного ИИК УРАН-3 радиофизические методы дистанционной диагностики ионосферы дают возможность выявлять и идентифицировать искусственные акустические ионосферные возмущения, вызванные излученной за 60 с акустической энергией у поверхности Земли около 2 МДж.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДЫДУЩИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. В периоды с ноября по декабрь 1996 г. и с апреля по октябрь 1997 г. совместно ЛЦ ИКИ НАН и ГКА Украины и ФМИ НАН Украины были выполнены исследования искусственных акустико-ионосферных возмущений радиоастрономическим методом с использованием НУА-излучателя и радиотелескопа УРАН-3, [2, 6, 8, 24, 25, 27]. Исследования проводились на частоте 25 МГц. Акустическая волна излучалась НУА-излучателем, который функционировал в режиме однократного или  $n$ -кратного 60-с звучания с 60-с паузами между ними.

После обработки экспериментальных записей, зарегистрированных в процессе 24 сеансов наблюдений, выявлены импульсные всплески радиосигналов, которые идентифицированы как реакция ионосферы на акустическое возму-

щение и время задержки которых относительно начала акустического возмущения коррелирует с работой НУА-излучателя. По результатам статистической обработки результатов экспериментов было установлено наличие следующих устойчивых значений времен задержки, а именно:  $T = 5.8 \pm 0.5$  мин,  $20.7 \pm 2.3$  мин,  $29.3 \pm 1.3$  мин,  $41.7 \pm 2.3$  мин,  $59.6 \pm 4.2$  мин.

2. В 2006 г. были проведены совместные эксперименты ЛЦ ИКИ НАН и ГКА Украины и Институтом ионосферы МОН Украины по идентификации акусто-ионосферных эффектов с помощью методов некогерентного рассеяния и вертикального зондирования. Обнаруженные эффекты свидетельствовали о том, что акустическое воздействие изменяет вертикальную структуру нейтральной атмосферы. В отдельных экспериментах после действия акустического сигнала наблюдались изменения параметров нижней ионосферы. Однако однозначно связать их с действием акустического сигнала было сложно из-за небольшого количества экспериментов.

3. В ЛЦ ИКИ НАН и ГКА Украины в 2005 — 2006 гг. была проведена серия экспериментов по изучению влияния акустических возмущений в атмосфере на прохождение электромагнитного излучения ОНЧ-диапазона через ионосферу сверху. Выполнялся анализ сигналов, зарегистрированных наземным приемником ОНЧ-диапазона, путем сравнения распределе-

ния плотности фоновых вистлеров на протяжении одного часа до акустического возмущения и одного часа после. Было установлено, что временной промежуток с 5 по 50 мин после генерации акустического сигнала на поверхности Земли характеризуется возрастанием плотности вистлеров, что может свидетельствовать о возрастании прозрачности ионосферы для волн ОНЧ-диапазона.

4. Для дальнейшего изучения возможного акустически индуцированного явления возрастания радиопрозрачности ионосферы также была проведена серия наземно-космических экспериментов с прохождением излучения снизу вверх. В качестве приемника выступала соответствующая бортовая аппаратура европейского спутника «Demeter», а в качестве реперных сигналов ОНЧ использовалось излучение навигационных станций РСДН-20 («Альфа») с частотами 11, 13 и 15 кГц. Эксперименты проводились как с использованием акустического возмущения, так и в его отсутствие. В результате оказалось, что интенсивность ОНЧ-излучения, зарегистрированного на борту спутника после акустического возмущения, существенно (на несколько порядков) выше, чем при его отсутствии.

#### СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА «ЛИНК-ЧИБИС»

Дата проведения эксперимента (28 ноября 2013 г.) и исходные данные для планирования (приведены в табл. 2—4) были выбраны на основе ситуационного анализа. Географические координаты наземного пункта Львов составляют:  $49.833^\circ$  N,  $24.000^\circ$  E;  $LST = UTC + 2$ . Благодаря особенностям орбиты МС на широте г. Львова движение осуществляется практически в направлении запад — восток, причем в светлый период указанного дня наблюдалось пять прохождений с разным удалением от указанного наземного пункта.

Последовательность операций в эксперименте представлена на рис. 1. В момент времени  $t$ , когда спутник находится на значительном удалении от предполагаемой зоны возмущенной среды, производится акустическое возмущение. Во время пролета спутника над зоной возмущения

Таблица 2. Исходные данные по КА, использованные в расчетах траектории по модели SGP4

Название	CHIBIS-M (RS-39)
Номер NORAD	38051
Номер COSPAR	2011-062-C
Эпоха	10:28:25 UTC 18 ноября 2013 г.
Наклонение	51.635
Эксцентриситет	0.0011334
Оборотов за сутки	15.38106808
Период	93.62 мин
Большая полуось	6 830 км
Перигей	444 км
апогей	459 км

(моменты времени 2, 3 и далее вдоль орбиты), его бортовая аппаратура фиксирует вариации электрического и магнитного полей до завершения сеанса измерений. Учитывая многочисленные наземные наблюдения за вариациями геомагнитного и геоэлектрического полей после акустических возмущений, реакция на возмущение ожидается приблизительно с пятой минуты после начала возмущения.

Таким образом, момент 1 времени включения акустического излучателя выбирается в пределах от 5 мин и более перед моментом 2.

В эксперименте 28.11.2013 г. согласно программе МС «Чибиc-М» пять раз пролетал вблизи точки расположения акустического излучателя, в связи с чем было запланировано пять сеансов наблюдений, два из которых (второй и четвертый) были активными, с наличием наземного акустического излучения (см. табл. 4). Временная диаграмма работы излучателя показана на рис. 2. Длительность состояний «включено» и «выключено» составляла 60 с.

Грубые оценки времен прихода переднего фронта акустического возмущения на вы-

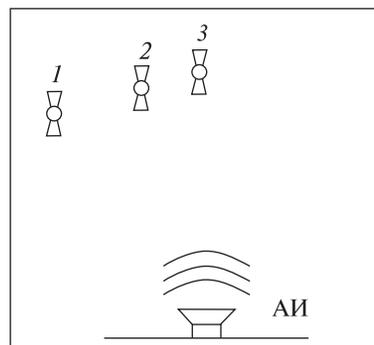


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: АИ — акустический излучатель, 1 — положение спутника в момент включения акустического излучателя, 2 — положение спутника в момент начала сеанса регистрации, 3 — положение спутника над точкой размещения акустического излучателя

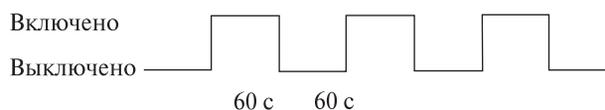


Рис. 2. Временная диаграмма работы акустического излучателя

Таблица 3. Наземно-орбитальная конфигурация, оптимальная для эксперимента (время наибольшего сближения н/п и КА и дистанция между ними, азимут и высота над горизонтом КА относительно н/п в это время)

UTC	Восточная долгота	Северная широта	Высота, км	Азимут	Высота	Дистанция, км	Номер витка
07:30:26	23.87°	49.74°	452.67	227.1°	87.7°	452.7	10 299
09:08:11	24.71°	51.72°	451.19	12.6°	62.8°	502.5	10 300
10:45:41	23.39°	48.41°	448.92	196.8°	68.3°	480.2	10 301
12:24:41	23.37°	37.64°	445.16	182.5°	11.5°	1469.6	10 302

Таблица 4. Схема включений акустического излучателя в эксперименте 28 ноября 2013 г. (время киевское)

Номер сеанса	Вход КА в зону радиовидимости	Выход КА из зоны радиовидимости	Время наибольшего приближения КА к н/п Львов	Время включения акустического излучателя
1	7:49	7:59	7:52	Без излучения
2	9:25	9:37	9:32	9:07
3	11:03	11:15	11:08	Без излучения
4	12:40	12:52	12:46	12:36
5	14:18	14:29	14:25	Без излучения

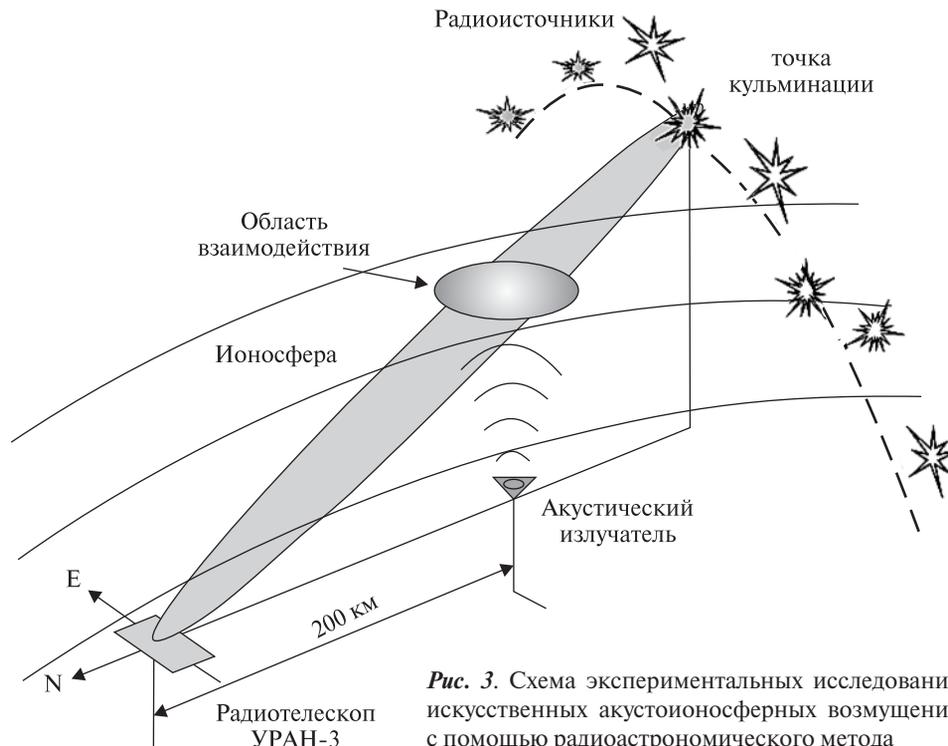


Рис. 3. Схема экспериментальных исследований искусственных акустоионосферных возмущений с помощью радиоастрономического метода

соту орбиты КА, составляющую 450 км, дают

$$\Delta t \sim \int_0^h dz / c(z) \approx 10 \text{ мин при использовании ат-}$$

мосферной модели MSISE2000 и, соответственно, 15 мин — для заднего фронта.

Для второго сеанса наблюдений (активного) момент времени 1 (рис. 1) был выбран за 20 мин до момента 2. Для четвертого сеанса (также активного) — за 10 мин.

В ходе эксперимента производились такие измерения:

- определение изменений радиопрозрачности ионосферы по изменению интенсивности космических источников;
- наземные наблюдения вариаций фонового ОНЧ-излучения;
- спутниковые наблюдения вариаций ОНЧ-излучения наземных радиостанций;
- регистрации сигналов от датчиков электрического и магнитного поля бортового комплекса МВК МС «Чибис-М».

Схема эксперимента по определению изменений радиопрозрачности ионосферы по изменению интенсивности космических источников приведена на рис. 3. В этом методе радиоизлучение космических радиоисточников используется в качестве зондирующего с дальнейшей регистрацией радиоизлучения группы космических источников (галактического фона) при фиксированном положении диаграммы направленности РТ УРАН-3. Геометрия эксперимента выбиралась таким образом, чтобы радиоизлучение космических источников могло взаимодействовать с акустической волной на высотах порядка 100—200 км.

Метод основывается на регистрации и анализе временных реализаций радиоизлучения космических радиоисточников, прошедшего сквозь ионосферу [7]. В эксперименте изучались особенности этих реализаций при воздействии на ионосферу акустического излучения НУА-излучателя, а также исследовалось, по каким информационным параметрам косми-

ческого радиоизлучения могут быть идентифицированы искусственные акустоионосферные возмущения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

**1. Анализ состояния космической погоды.** Для корректной идентификации ионосферных возмущений по данным измерений с помощью наземных и спутниковых средств необходимо иметь информацию о фоновом состоянии ионосферы в период выполнения эксперимента.

С целью предварительного анализа ситуации мы попытались ответить на вопросы: 1) каково было состояние ионосферы, контролируемое стандартными средствами, накануне, в день экспозиции и последующие дни? 2) были ли какие-то аномалии в суточном ходе магнитного поля, судя по наземным измерениям? 3) можно ли приписать такие аномалии (если они есть) влиянию факторов космической погоды или их можно соотнести с наземными факторами?

Для этого были использованы данные всемирной магнитометрической сети INTERMAGNET, данные об индикаторах состояния космической погоды (индексы  $A_p$ ,  $K_p$ ,  $AU$ ,  $AL$ ,  $F_{10.2}$ , максимальные за текущие сутки значения скорости солнечного ветра, южной составляющей межпланетного магнитного поля (ММП), наличие в солнечном ветре ударных волн).

Для анализа локальных геомагнитных возмущений были взяты поминутные данные за 30 дней ноября 2013 г., полученные во Львовской магнитной обсерватории сети INTERMAGNET, и расположенной на  $7^\circ$  к югу магнитной обсерватории этой сети в Панагюриште (Болгария). Было установлено, что вариации геомагнитного поля на протяжении 10 сут перед экспериментом соответствовали спокойному состоянию.

Анализ индексов возмущенности ионосферы  $AU$ ,  $AL$ ,  $AE$  (WDC for Geomagnetism, Kyoto) дал спокойное состояние ионосферы 25, 26, 27, 28 ноября примерно до 16:00 UT 28.11.2013 г., после чего 10 станциями в приполярной области было зафиксировано нарастание уровня возмущений. То же относится к индексу  $D_{st}$ . Поэтому можно предположить, что в первой половине 28 ноября 2013 г. вход в авроральную ионосферу существ-

венных колебаний магнитогидродинамического типа был маловероятен. Соответственно, вероятность возникновения движущегося к югу блуждающего ионосферного возмущения (TID) представляется малой. Следовательно, можно исключить появление существенных периодических вариаций ТЕС в зоне эксперимента, связанных с прохождением TID.

Потоки от Солнца ( $F_{10.2}$ ) на протяжении 26 и 27 ноября, а также в день эксперимента (28 ноября) были на обычном уровне и не содержали особенностей. Усиление солнечного ветра (по скорости, южной составляющей) началось на следующий день, в 10 — 12 ч 29 ноября и связано с усилением активности Солнца, начавшимся в этот день.

Суммарно, заключаем, что в период проведения эксперимента фоновое состояние ионосферы было спокойным, возникновение ионосферных неоднородностей за счет влияния факторов космической погоды было маловероятным.

**2. Результаты наземных наблюдений вариаций ОНЧ-излучений.** В ходе эксперимента в ЛЦ ИКИ проводилась регистрация вариаций электромагнитных волн диапазона ОНЧ в области над излучателем, интенсивность которых может служить оценкой воздействия акустического возмущения на ионосферу.

При регистрации фиксировалось количество появлений электронных и ионных свистов за каждые 180 с. Распределение количества этих свистов представлено на рис. 4. На основе графика можно сделать качественный вывод, что после акустического возмущения интенсивность сигналов ОНЧ длительное время имеет высокий уровень. Это позволяет оценить предполагаемое время реакции среды на акустическое возмущение.

**3. Результаты спутниковых наблюдений вариаций ОНЧ-излучений.** Во время эксперимента с помощью приборов МС «Чибиc-М» проводились наблюдения ОНЧ-излучения наземных станций, прошедшего через ионосферу. Для выявления возможного возрастания необходимо было иметь записи ОНЧ-излучения на частотах радиомаяков также и без включения акустического излучателя.

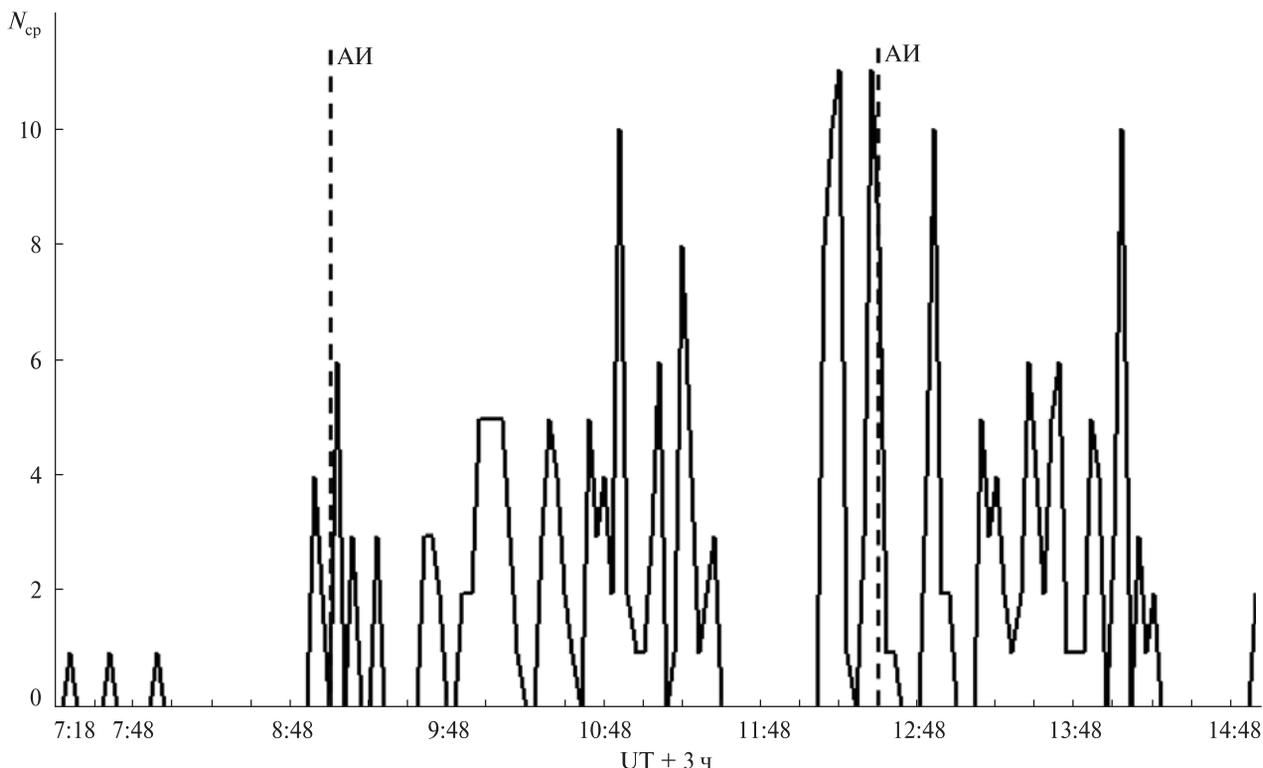


Рис. 4. Распределение количества электронных и ионных свистов (АИ — момент акустического излучения)

В качестве реперных сигналов использовались радиосигналы станций системы РСДН-20 с частотами 11—15 кГц. Однако технически спутниковые записи данных ОНЧ-излучения удалось осуществить лишь с частотой дискретизации, существенно меньшей, чем необходимо для качественной записи и обнаружения искомых сигналов.

Кроме того, в выполненных сеансах измерений минимальное расстояние проекции орбиты спутника до точки акустического возмущения составляло 150 км и более, что существенно превышает оценки для горизонтальных размеров возмущенной области ионосферы, полученные ранее в ходе аналогичных экспериментов со спутником «Demeter».

Таким образом, данные этого эксперимента не будут учтены при комплексной обработке.

**4. Исследования с помощью радиотелескопа УРАН-3.** В процессе подготовки и проведения эксперимента «ЛИНК-Чибис» последовательно

регистрировалось радиоизлучение галактического фона без акустического возмущения и во время работы НУА-излучателя.

На рис. 5 (см. цветную вклейку) приведена экспериментальная запись динамического спектра радиоизлучения галактического фона в полосе 16 — 32 МГц (рис. 5, а) и его временной профиль на частоте 24 МГц (рис. 5, б). Запись проведена 24.11.2013 г. в отсутствие акустического излучения НУАИ. Время суток для данной записи совпадает со временем работы НУАИ (стрелка) 28.11.2013 г. в соответствии с графиком пролета микроспутника «Чибис-М» над территорией Западной Украины.

На рис. 5, в, г приведены экспериментальные записи (28.11.2013 г. в период с 07:00:00 UT до 08:00:00 UT во время пролета МС «Чибис-М» над территорией Западной Украины): динамического спектра радиоизлучения Галактического фона в полосе 16—32 МГц (рис. 5, в) и его временного профиля на частоте 24 МГц (рис. 5, г). Красной

стрелкой обозначено время начала акустического излучения (07:07:00 UT или 09:07:00 по киевскому времени). Напоминаем, что НУА-излучатель функционировал в режиме трехразового 60-с излучения с 60-с паузами между ними.

**5. Интерпретация результатов измерений с помощью радиотелескопа УРАН-3.** Без акустического возмущения (рис. 5). Запись радиоизлучения галактического фона без акустического возмущения в выбранном участке небесной сферы, который был определен с учетом координат радиотелескопа УРАН-3, МС «Чибис-М» и НУА-излучателя, а также предполагаемой ионосферной высоты распространения акустической волны, характеризуется достаточно равномерным уровнем радиоизлучения фона во всей полосе 16–32 МГц и равномерным распределением кратковременных (очень малой длительности) случайных электромагнитных помех (например, на записи рис. 5, а на частоте 24 МГц).

После акустического возмущения (рис. 5, в, г). После акустического возмущения, которое началось в 07:07:00 UT (красные стрелки), примерно через 4.5 мин от его начала, что соответствует времени вертикального распространения акустической волны до высот нижней ионосферы (~ 80 км), наблюдается возрастание интенсивности космического радиоизлучения фона (белая стрелка на рис. 5, в и голубая стрелка на рис. 5, г), что, с учетом приведенных выше данных о спокойном состоянии ионосферы, может указывать на увеличение прозрачности ионосферной плазмы при распространении через нее декаметрового радиоизлучения космических радиоисточников [25].

Примерно через 40 мин от начала акустического возмущения (с 07:46 UT до 07:56 UT, зеленые стрелки на рис. 5, г) наблюдается появление повторного электромагнитного отклика, можно ожидать, что это есть следствие генерации и распространения вдоль магнитных силовых линий движущихся ионосферных возмущений искусственного акустического происхождения.

Результаты наблюдений искусственно вызванной акустической модификации ионосферы при работе НУА-излучателя, полученные в процессе проведения эксперимента 28.11.2013 г., хорошо

коррелируют с результатами описанных выше экспериментов 1996–1997 гг.

В эксперименте 28.11.2013 г. также определены задержки реакции ионосферы, соответствующие первой и четвертой из полученных в предыдущих экспериментах оценок, а именно:  $T \approx 4.5$  и 40 мин.

**6.** Результаты экспресс-обработки данных с МС «Чибис-М» 28.11.2013 г. На рис. 6 (см. цветную вклейку) приведены трасса МС «Чибис-М» во время измерений и полученные частотно-временные диаграммы составляющих магнитного ( $B_z$ ) и электрического ( $E$ ) поля при наличии акустического возмущения (момент включения 07:07 UT) для отрезка времени 07:26:41 — 07:37:05 UT 28 ноября 2013 г. На рис. 7 и 8 (см. цветную вклейку) приведены такие же данные соответственно для отрезков времени 09:04:41 — 09:15:02 UT (в отсутствие акустического возбуждения) и 10:41:41 — 10:52:06 UT (с акустическим возбуждением, момент включения 10:36 UT). Из сравнения диаграмм можно заключить, что как для магнитного, так и для электрического поля имеются отличия между случаями отсутствия и наличия акустического возмущения. Появляются выраженные линейчатые структуры (в записи — короткие широкополосные импульсы длительностью 6–7 с, что при скорости КА в 7.9 км/с составляет примерно 50 км, при этом расстояние между линейными элементами — от 50 до 500 км), максимальная мощность смещается в низкочастотную область ( $\leq 8$  Гц). Более детально низкочастотную структуру видим на рис. 5, д (см. цветную вклейку), где максимум расположен в диапазоне 0.1–0.8 Гц.

## ВЫВОДЫ

1. Результаты наземных наблюдений свидетельствуют об изменении состояния ионосферы под воздействием акустических возмущений.

2. Подтверждена эффективность ИИС на базе декаметрового радиотелескопа УРАН-3, для дистанционного зондирования наземными средствами изменений состояния ионосферной плазмы, обнаружены корреляции времен возникновения радиопрозрачности и прихода в ионосферу (на высоту примерно 80 км) акусти-

ческого возмущения, созданного акустическим генератором ЛЦ ИКИ, причем существенных вариаций ТЕС в этой области ионосферы зафиксировано не было.

3. На данных во всем диапазоне частот датчиков МВК МС «Чибис-М» не просматриваются специфические отличия сигналов на удалении приблизительно  $\pm 100$  км ( $\pm 12$  с) до и после ближайшей точки орбиты спутника к точке нахождения акустического излучателя.

4. Из сравнения диаграмм «частота — время» для измерений МВК МС «Чибис-М» можно заключить, что как для магнитного, так и для электрического поля имеются отличия между случаями отсутствия и наличия акустического возмущения на временах порядка 20 мин после включения акустического возмущения.

5. Установлена необходимость комплексного применения наземного управляемого акустического излучателя, КА типа «Чибис-М» и наземных средств типа радиотелескопа УРАН-3 для проведения исследований искусственной акустической модификации ионосферы и набора статистики.

6. Результаты эксперимента (по наземной, атмосферной и ионосферной части) представленные в исследовательской базе данных, как ожидается, будут служить основой для развития нового комплексного направления — наземно-космического акустического исследования состояния ионосферы.

*Работа поддержана Целевой комплексной программой НАН Украины по космическим исследованиям на 2012—2016 гг.*

1. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журн. наук о Земле. — 2000. — 2, № 2. — С. 95—108.
2. Дистанційне радіозондування слабких акусто-іоносферних збурень з використанням радіофізичних комплексів на базі радіотелескопа УРАН-3: Експериментальні і теоретичні дослідження декаметрового радіовипромінювання галактичних та позагалактичних джерел методом інтерферометрії: (Звіт про НДР) / Фізико-механічний інститут НАН України. — № 0197U003373. — Львів. 1999. — С. 223—330.
3. Досин Д. Г., Ивантишин О. Л., Кошовый В. В., Лозинский А. Б. Ионосферно-диагностический комплекс ИДК УРАН-3 // Відбір і обробка інформації. — 1997. — Вип. 11(87). — С. 3—7.
4. Исследование и разработка методов восстановления радиоизображений и радиоакустики для изучения влияния солнечной акустики в декаметровом диапазоне волн на процессы в ионосфере и тропосфере: (Отчет по НИР) / Фізико-механічний інститут АН України. — Львов, 1991. — 370 с.
5. Ивантишин О. Л. Інформаційно-вимірвальний комплекс на базі радіотелескопа УРАН для дослідження слабких акусто-іоносферних збурень: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Львів: Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, 2007.
6. Кошовой В. В. Радиофизическая и радиоастрономическая диагностика ионосферных эффектов, вызванных наземным инфразвуковым излучателем (предварительные результаты) // Изв. вузов. Радиофизика. — 1999. — 42, № 8. — С. 785—798.
7. Кошовый В. В., Ивантишин О. Л. Дослідження штучних акусто-іоносферних збурень радіоастрономічним методом // Відбір і обробка інформації. — 1999. — Вип. 13(89). — С. 21—25.
8. Кошовый В. В., Сорока С. О. Акустичне збурення іоносферної плазми наземним випромінювачем. I. Експериментальне виявлення акусто-іоносферних збурень // Космічна наука і технологія. — 1998. — 4, № 5/6. — С. 3—17.
9. Краснов В. М. Характеристики распространения слабких ударных волн в неоднородной атмосфере // Акуст. журн. — 1993. — 39, № 3. — С. 498—504.
10. Краснов В. М., Кулешов Ю. В. Изменение спектра инфразвукового сигнала при распространении волн от земной поверхности до высот ионосферы // Акуст. журн. — 2014. — 60, № 1. — С. 21—30.
11. Незода А. А., Сорока С. А. Перспективы развития исследований атмосферы ионосферы с использованием искусственного акустического воздействия // Космічна наука і технологія. — 1999. — 5, № 2/3. — С. 3—12.
12. Новиков Д. И., Климов С. И., Корепанов В. Е. и др. Магнитно-волновой комплекс микроспутника «Чибис-М» для изучения электромагнитных параметров космической погоды // Сер. «Механика, управление и информатика»: сб. тр. / Под ред. Р. Р. Назирова. — М.: ИКИ РАН, 2009. — С. 78—89. — <http://www.cosmos.ru/books/2009chibis-m.pdf>.
13. Руденко О. В. Нелинейные пилообразные волны // Успехи физ. наук. — 1995. — 165, № 9. — С. 1011—1036.
14. Спосіб оцінювання інфразвукової обстановки на поверхні землі на основі акусто-електромагнітного моніторингу іоносфери: Дек. пат. на кор. мод. № 59531, Україна, МПК G01W 1/08. — № u201010307; заявл. 25.10.2010; опубл. 25.05.2011, Бюл. № 10. — 4 с.

15. Черемных О. К., Селиванов Ю. А., Захаров И. В. Влияние сжимаемости и неизотермичности атмосферы на распространение акусто-гравитационных волн // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 1. — С. 9—19.
16. Aburjania G. D., Machabeli G. Z. Generation of electromagnetic perturbations by acoustic waves in the ionosphere // J. Geophys. Res. — 1998. — **103**, N A5. — P. 9441—9447.
17. Aramyan A. R., Galechyan G. A., Harutyunyan G. G., et al. Modeling of interaction of acoustic waves with Ionosphere // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2008. — **36**, N 1. — P. 305—309.
18. Aramyan A. R., Galechyan G. A., Harutyunyan G. G., Manukyan G. V. Transformation of acoustic waves in upper atmosphere // Laser Phys. — 2010. — **20**, N 1. — P. 298—301.
19. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary // Ann. geophys. — 1985. — N 3. — P. 673—688.
20. Donn W. L., Rind D. Natural infrasound as an atmospheric probe // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1971. — N 26. — P. 111—133.
21. Drobzheva Ya. V., Krasnov V. M. The spatial structure of the acoustic wave field generated in the atmosphere by a point explosion // Acoustical Phys. — 2001. — **47**, N 5. — P. 556—564.
22. Galperin Yu., Hayakawa M. On a possibility of parametric amplifier in the stratosphere-mesosphere suggested by active MASSA experiments with the AUREOL-3 satellite // Earth Planets Space. — 1998. — N 50. — P. 827—832.
23. Garces M., Drob D. P., Picone J. M. A theoretical study of the effect of geomagnetic fluctuations and solar tides on the propagation of infrasonic waves in the upper atmosphere // Geophys. J. Int. — 2002. — N 148. — P. 77—87.
24. Gotinyan O. E., Ivchenko V. V., Rapoport Yu. G. Model of the internal gravity waves excited by lithospheric greenhouse effect gases // Space Sci. and Technology. Suppl. — 2001. — **7**, N 2. — P. 26—33.
25. Grimalsky V. V., Koshevaya S. V., Perez-Enriquez R., Kotsarenko A. N. Nonlinear excitation of ULF atmosphere-ionosphere waves and magnetic perturbations caused by ELF seismic acoustic bursts // Phys. scr. — 2003. — **67**, N 3. — P. 453—456.
26. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. — 1960. — **38**. — P. 1441—1481.
27. Koshevaya S. V., Grimalsky V. V., Burlak G. N., et al. Magnetic perturbations excited by seismic waves // Phys. scr. — 2001. — **64**, N 2. — P. 172—176.
28. Koshevaya S. V., Grimalsky V. V., Siquieros-Alatorre J., et al. Acoustic and acousto-gravity wave pulses caused by sources of seismic origin // Phys. scr. — 2004. — **70**, N 1. — P. 72—78.
29. Koshovy V. V., Ivantyshyn O. L. Research of the artificial acousto-ionospheric disturbances // XXVI<sup>th</sup> General Assembly of the International Union of Radio Science: Abstracts (August 13—21, 1999, Toronto, Canada). — Toronto: University of Toronto, 1999. — P. 506.
30. Koshovy V., Nazarchuk Z., Romanyshyn I., et al. Acousto-electromagnetic investigations of an acoustical channel of the lithosphere-ionosphere interaction // XXVIII General Assembly of International Union of Radio Science (URSI): Proceedings (October 23—29, 2005, New Delhi, India). — New Delhi, 2005. — 4 p.
31. Kotsarenko N. Ya., Pérez Enriquez R., Koshevaya S. V. Excitation of plasma waves in the ionosphere caused by atmospheric acoustic waves // Astrophys. and Space Sci. — 1996. — **246**, N 2. — P. 211—217.
32. Kotsarenko N. Ya., Soroka S. A., Koshevaya S. V., Koshovy V. V. Increase of the transparency of the ionosphere for cosmic radiowaves caused by a low frequency wave // Phys. scr. — 1999. — **59**. — P. 174—181.
33. Laštovička Ja. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2006. — N 68. — P. 479—497.
34. Mityakov N. A. Parametric acoustic antenna in the atmosphere // Radiophys. and Quant. Electron. — 2006. — **49**, N 7. — P. 514—519.
35. Naugolnykh K. A., Rybak S. A. Sound propagation in an unstable atmospheric layer // Acoustical Phys. — 2007. — **53**, N 3. — P. 417—420.
36. Ostrovsky L. A. Ionospheric effects of ground motion: The roles of magnetic field and nonlinearity // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2008. — N 70. — P. 1273—1280.
37. Pilipenko V. A., Fedorov E. N. Modulation of the total electron content in the ionosphere by geomagnetic pulsations // Geomagnetism and Aeronomy (eng. translation). — 1995. — **34**, N 4. — P. 516—519.
38. Pokhotelov O. A., Parrot M., Fedorov E. N., et al. Response of the ionosphere to natural and man-made acoustic sources // Ann. Geophys. — 1995. — **13**, N 11. — P. 1197—1210.
39. Rapoport V., Bessalov P., Mityakov N. A., et al. Feasibility study of ionospheric perturbations triggered by monochromatic infrasonic waves emitted with a ground-based experiment // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2004. — **66**, N 12. — P. 1011—1017.
40. Rapoport Yu. G., Gotinyan O. E., Ivchenko V. M., et al. Effect of acoustic-gravity wave of the lithospheric origin on the ionospheric F region before earthquakes // Phys. Chem. Earth. — 2004. — **29**. — P. 607—616.
41. Rapoport Yu. G., Hayakawa M., Gotinyan O. E., et al. Stable and unstable plasma perturbations in the ionospheric F region, caused by spatial packet of atmospheric gravity waves // Phys. Chem. Earth. — 2009. — **34**. — P. 508—515.

Стаття надійшла до редакції 13.03.14

О. К. Черемных, С. И. Климов, В. Е. Корепанов,  
В. В. Кошовый, М. О. Мельник, О. Л. Ивантишин,  
В. П. Мезенцев, Р. Т. Ногач, Ю. Г. Рапопорт,  
Ю. О. Селиванов, Л. П. Семенов

#### НАЗЕМНО-КОСМІЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ЗІ ШТУЧНОЇ АКУСТИЧНОЇ МОДИФІКАЦІЇ ІОНОСФЕРИ. ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ

Наземно-космічний експеримент з дослідження впливу штучних акустичних збурень на іоносферу було проведено 28 листопада 2013 р. В експерименті були задіяні мікросупутник «Чібіс-М» (ІКД РАН), потужний стаціонарний акустичний випромінювач (ЛЦ ІКД НАНУ-ДКАУ) та декаметровий радіотелескоп УРАН-3 (ФМІ НАНУ). Під час експерименту було проведено п'ять сеансів реєстрації варіацій магнітних та електричних полів на борту супутника в моменти прольоту поблизу точки розташування акустичного випромінювача. Наведено результати попереднього аналізу підсумків експерименту.

O. K. Cheremnykh, S. I. Klimov, V. E. Korepanov,  
V. V. Koshovy, M. O. Melnik, O. L. Ivantyshyn,  
V. P. Mezentsev, R. T. Nogach, Yu. G. Rapoport,  
Yu. A. Selivanov, L. P. Semenov

#### GROUND-SPACE EXPERIMENT FOR ARTIFICIAL ACOUSTIC MODIFICATION OF IONOSPHERE. SOME PRELIMINARY RESULTS

Ground-Space experiment to investigate the impact of artificial acoustic radiation on the ionosphere was conducted on November 28, 2013. In experiment, there were used "Chibis-M" microsatellite by Institute for Space Research of Russian Academy of Sciences, powerful stationary acoustic emitter by Lviv Centre of Space Research Institute of National Academy of Sciences and State Space Agency of Ukraine and decameter radiotelescope URAN-3 by Institute of Physics and Mechanics of National Academy of Sciences of Ukraine. During the experiment, 5 sessions of registering magnetic and electric field variations on board of the microsatellite were conducted at the time of flight near the location of the acoustic emitter. The results of the preliminary analysis of the experiment outcome are presented.

#### ПОДПИСИ К ВКЛЕЙКЕ

**Рис. 5.** Динамический спектр радиоизлучения галактического фона и его временной профиль: *a, б* — запись 24 ноября 2013 г.; *в, г* — запись 28 ноября 2013 г. во время работы наземного управляемого акустического излучателя и пролета микроспутника «Чибис-М» над территорией Западной Украины; *д* — бортовые измерения электрического поля во время работы акустического излучателя (момент включения 07:07 UT) после применения фильтра высоких частот Баттерворта второго порядка с частотой среза 0.1 Гц

**Рис. 6.** Трасса МС «Чибис-М» (*a*) и частотно-временные диаграммы составляющих магнитного (*б, в*) и электрического (*г, д*) поля при наличии акустического возмущения (момент включения 07:07 UT), измеренных на борту МС «Чибис-М» в период 07:26:41 — 07:37:05 UT 28 ноября 2013 г.

**Рис. 7.** То же для отрезка времени 09:04:41 — 09:15:02 UT (в отсутствие акустического возбуждения, интервал измерений разбит на два подынтервала)

**Рис. 8.** То же для отрезка времени 10:41:41 — 10:52:06 UT (с акустическим возбуждением, момент включения 10:36 UT)

До статті О. К. ЧЕРЕМНИХ та ін.

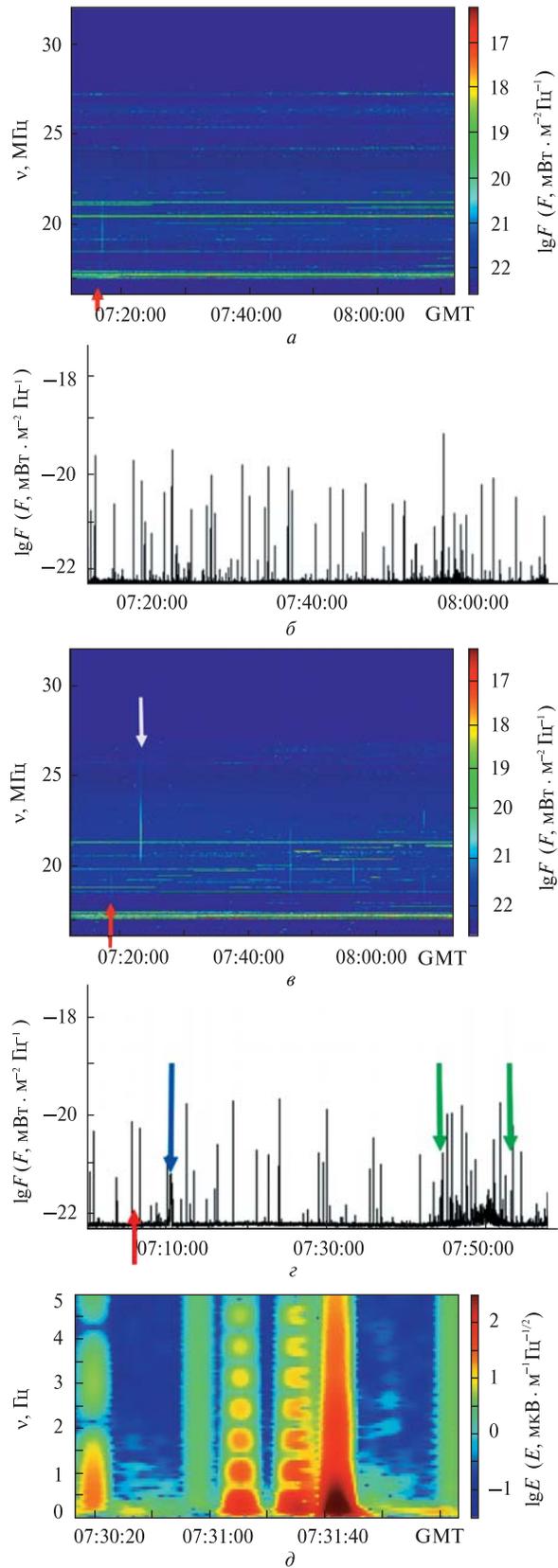


Рис. 5

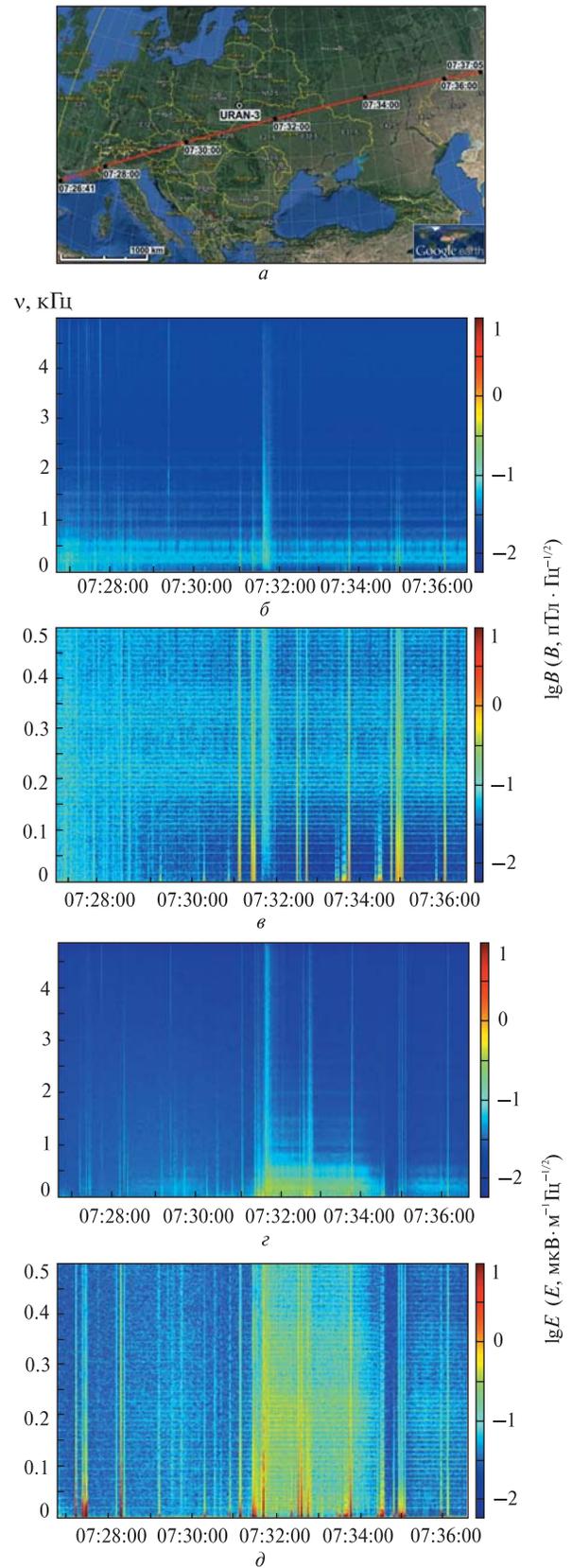
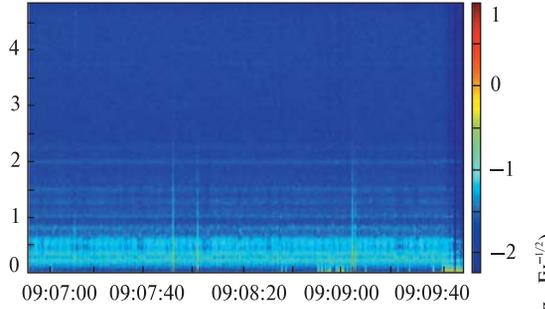


Рис. 6

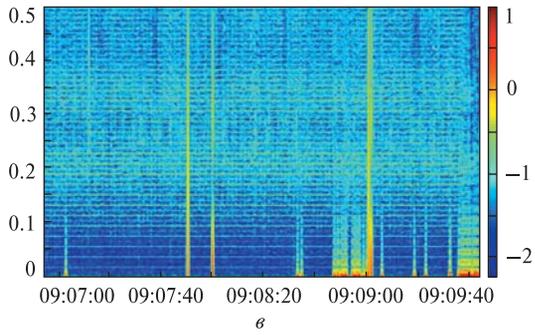


*a*

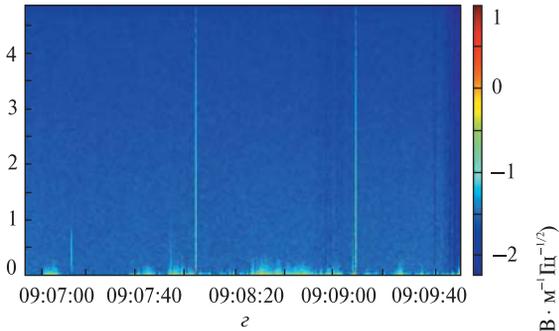
$v, \kappa \Gamma \Pi$



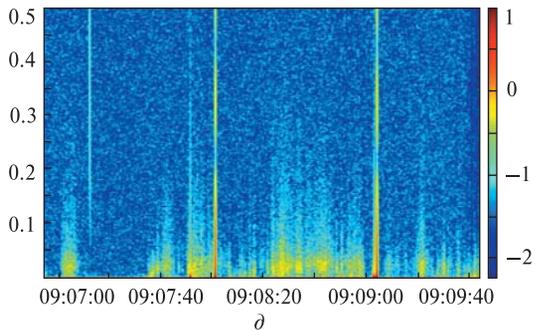
*б*



*в*



*г*



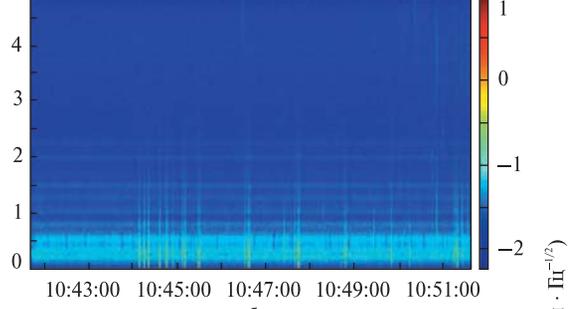
*д*

*Рис. 7*

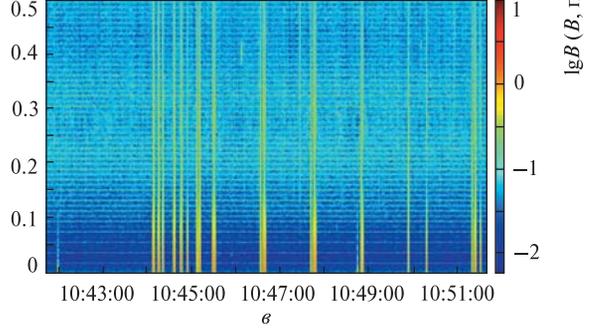


*a*

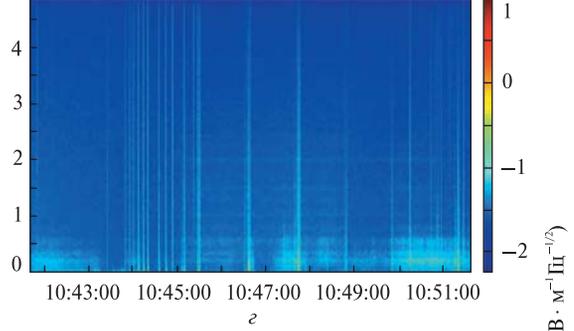
$v, \kappa \Gamma \Pi$



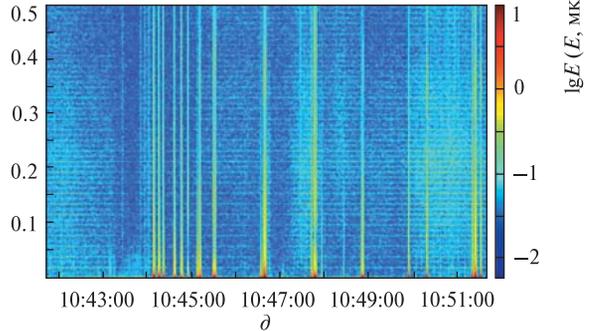
*б*



*в*



*г*



*д*

*Рис. 8*