

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В
АТМОСФЕРЕ

Н.И. Иванова *, И.П. Сидоров **, Ф.В. Петров ***

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия*

Институт космических исследований НАНУ и НКАУ, г. Киев, Украина

Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю.

Шмидта РАН (ГО «Борок» ИФЗ РАН), пос. Борок (Ярославская обл.), Россия

**e-mail: ivan28@izmiran.ru*

***e-mail: john_k@i.ua*

****e-mail: petr@borok.yar.ru*

Поступила в редакцию

После доработки

Принята к публикации

По данным измерений на спутнике Dynamic Explorer 2 исследованы особенности распространения акустико-гравитационных волн в многокомпонентной верхней атмосфере. В интервале высот 250–400 км в волновых вариациях концентраций отдельных сортов атмосферных газов наблюдались амплитудно-фазовые различия. С помощью предложенного в работе подхода регистрируемые в разных газах вариации волн разделены на составляющие, обусловленные упругим сжатием, адиабатическим расширением и высотным фоновым распределением. На основе анализа этих составляющих дано объяснение наблюдаемых в разных газах амплитудно-фазовых различий. Показано, как можно использовать этот эффект для определения направления движения волны, вертикального смещения элемента объема, частоты волны и пространственного распределения плотности волновой энергии.

1. ВВЕДЕНИЕ

Акустико-гравитационные волны (АГВ) наблюдаются во всей толще атмосферы от приземных слоев до высот ~450–500 км, где область их существования ограничивается разреженностью среды [Дикий, 1969; Hines, 1960; Iwata et al., 2001]. Несмотря на полувековую историю запусков космических аппаратов (КА), количество контактных спутниковых данных измерений, которые можно использовать для изучения АГВ в параметрах нейтральной атмосферы, остается ограниченным. Основная причина этого состоит в том, что на низкие ионосферные орбиты, необходимые для подобных исследований, спутники запускаются редко. Кроме того, для диагностики свойств

нейтральной атмосферы необходимы довольно громоздкие датчики, например, масс-спектрометры, ...

Целью данной работы является исследование физических механизмов наблюдаемых со спутника амплитудно-фазовых отличий в разных сортах газов.

2. СВОЙСТВА АТМОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ АГВ

В земной атмосфере выше турбопаузы отдельные атмосферные газы распределены с высотой в соответствии с их индивидуальными высотными масштабами в поле силы тяжести $n_i(z) = n_{i0} \exp(-z/H_i)$, где индекс i обозначает отдельный сорт газа; n_i - концентрации компонентов; $H_i = kT/m_i g$ - высота однородной атмосферы для отдельного сорта газа; k - постоянная Больцмана; T - температура нейтральных частиц; m_i - масса молекулы или атома; g - ускорение силы тяжести [Monger and Journeay, 1994]. На каждом высотном уровне выполняются соотношения

$$p(z) = \sum n_i(z)kT(z); \quad \rho(z) = \sum n_i(z)m_i, \quad (1)$$

где суммирование проводится по всем сортам атмосферных газов. Из выражений (1) следует, что на каждом уровне

$$p(z) = \rho(z)gH(z), \quad (2)$$

где

$$H(z) = \frac{kT(z)}{m(z)g}; \quad m(z) = \frac{\sum n_i(z)m_i}{\sum n_i(z)}. \quad (3)$$

2.1. Вертикальные распределения давления и плотности

В предположении гидростатического равновесия атмосферы

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (4)$$

из соотношений (1)–(4) следуют выражения, описывающие вертикальные распределения невозмущенных давления и плотности:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} = -\frac{1}{H}, \quad \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} = -\frac{1}{H} \left(1 + \frac{dH}{dz} \right). \quad (5)$$

Высотный ход давления описывается обычной барометрической зависимостью, в то время как для распределения плотности появляется дополнительное слагаемое

$$\frac{dH}{dz} = \frac{H}{T} \frac{dT}{dz} - \frac{H}{m} \frac{dm}{dz}. \quad (6)$$

Параметр dH/dz определяется вертикальным распределением температуры и изменением с высотой средней молекулярной массы. В интервале высот спутниковых наблюдений АГВ (~250–400 км) атмосферный газ состоит в основном из атомарного кислорода O и молекулярного азота N₂, другие газы (Ar, He, H) можно считать малыми добавками [Федоренко, 2008]. Вследствие большой теплопроводности выше 250 км температура в атмосфере фактически не зависит от высоты, поэтому dH/dz определяется в основном изменением средней молекулярной массы. С учетом выражения (3) для изотермической атмосферы получим

$$\frac{dH(z)}{dz} = -\frac{kT}{gm^2} \frac{dm}{dz} = -\frac{kT}{g} \left[\frac{\sum n_i / H_i}{\sum m_i n_i} - \frac{\sum n_i \sum m_i n_i / H_i}{(\sum m_i n_i)^2} \right] = \frac{\sum n_i \sum m_i^2 n_i}{(\sum m_i n_i)^2} - 1. \quad (7)$$

... В таблицах 1, 2 приведены результаты расчетов. Таблица 1 представляет собой оценки параметров..., а сравнение скоростей различных мод показано в табл. 2.

2.2. Случай смеси двух газов

В рассматриваемом интервале высот при вычислении (7) можно ограничиться только двумя газами O и N₂. Для смеси двух газов

$$\frac{dH}{dz} = \frac{n_1 n_2 (m_1 - m_2)^2}{(m_1 n_1 + m_2 n_2)^2}. \quad (8)$$

Используя высотные распределения $n_i(z)$ по модели атмосферы MSIS-90, согласно выражению (8) получаем, что на высотах спутниковых наблюдений АГВ величина dH/dz составляет ~0.1 на высоте 250 км и ~0.05 на высоте 400 км. Таким образом, различие высотных распределений фоновых давления и плотности на упомянутых высотах не превышает 10%.

3. НАБЛЮДЕНИЯ АГВ В РАЗНЫХ СОРТАХ ГАЗОВ

Для исследования параметров АГВ были использованы измерения концентраций атмосферных газов на спутнике Dynamic Explorer 2 (DE 2). Эллиптическая орбита этого спутника высотой 250–1010 км и наклоном 89.9° была ориентирована таким образом, что низкие участки витков приходились преимущественно на полярные области. Именно в этих областях сосредоточены наиболее мощные источники возмущений верхней атмосферы и, следовательно, часто наблюдаются АГВ с большими амплитудами. Концентрации нейтральных составляющих верхней атмосферы: атомарного кислорода $n(\text{O})$, молекулярного азота $n(\text{N}_2)$, аргона $n(\text{Ar})$ и гелия $n(\text{He})$ измерялись на спутнике DE 2 с помощью масс-спектрометра в эксперименте NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) [Felder et al., 2007]. Распределения концентраций разных сортов газов вдоль отдельного витка показаны на рис. 1а, б, в. Абсолютные концентрации рассмотренных газов по порядку величины составляют: $n(\text{O}) \sim 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$; $n(\text{N}_2) \sim 10^8 \text{ см}^{-3}$; $n(\text{Ar}) \sim 10^5 - 10^6 \text{ см}^{-3}$. В полярных областях отчетливо видны волновые возмущения, которые накладываются на крупномасштабные изменения параметров не волновой природы, вызванные изменением высоты орбиты, времени суток, уровня геомагнитной активности. Выделение волновых вариаций из исходных рядов данных проводилось с использованием фильтра скользящего среднего по методике, описанной в работе [Федоренко, 2008]. На рисунке 2 показаны относительные вариации dn_i/n_i в этих же газах (нормирование производится на фоновые усредненные значения). На рисунке 3 показаны ...

Полагаем, что для скоростей частиц газа сорта “ i ” выполняется $v_i = v$ и $v_{z_i} = v_z$, где v и v_z - соответственно полная и вертикальная скорость объема газа в волне. Вычитая из (10) выражение (9), с учетом (5) и того, что $(1/\rho_i)\partial\rho_i/\partial z = -1/H_i$, получим

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\rho_i}{\rho_i} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\rho}{\rho} \right) = \left(\frac{1}{H_i} - \frac{1}{H} - \frac{1}{H} \frac{dH}{dz} \right) v_z. \quad (11)$$

Для монохроматической волны $\partial/\partial t = i\omega$, $v_z = i\omega h$, где h – вертикальное смещение объема газа; ω - частота волны. Из соотношения (11) получаем выражение для связи относительных вариаций концентрации отдельного сорта газа с общими вариациями плотности

$$\frac{d\rho_i}{\rho_i} = \frac{dn_i}{n_i} = \frac{d\rho}{\rho} + \left(\frac{H}{H_i} - 1 - \frac{dH}{dz} \right) \frac{h}{H}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) [Dudis and Reber, 1976] следует важное соотношение, позволяющее по

измерениям концентраций любой пары газов определить вертикальное смещение объема газа в волне

$$\frac{h}{H} = \frac{m}{m_1 - m_2} \left(\frac{dn_1}{n_1} - \frac{dn_2}{n_2} \right). \quad (13)$$

Отметим, что выражение (13) справедливо не только для АГВ, а и для любого типа распространяющейся волны, в которой происходят смещения объема по вертикали. Такая уникальная возможность для определения вертикального смещения возникает из-за гравитационно-диффузионного разделения отдельных газов в поле силы тяжести. Очевидно, что ниже турбопаузы, где все dn_i / n_i равны друг другу, такой метод определения h не применим.

5. АКУСТИЧЕСКАЯ И ГРАВИТАЦИОННАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ АГВ

Вариации плотности атмосферы, вызванные распространением АГВ, обусловлены несколькими факторами: 1) продольным волновым сжатием за счет градиента давления; 2) адиабатическим расширением (сжатием) элементарного объема газа при его вертикальных смещениях под действием силы тяжести; 3) перепадом фоновой концентрации при вертикальных смещениях. Используя базовые теоретические соотношения [Eagleson, 2003; Felder et al., 2007], вариации плотности монохроматической плоской АГВ в приближении однокомпонентной среды можно представить в виде [Felder et al., 2007]

$$\frac{d\rho}{\rho} = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \frac{h}{H} + \frac{v_x U_x}{c_s^2}, \quad (14)$$

где $U_x = \omega / k_x$ - горизонтальная фазовая скорость волны; k_x - горизонтальная компонента волнового числа; v_x - горизонтальная скорость объема газа в волне; c_s - скорость звука; γ - показатель адиабаты. Первое слагаемое в (14) отражает эффекты силы тяжести в наблюдаемых вариациях плотности. Обозначим его

$$Gr = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \frac{h}{H} \quad (15)$$

и назовем гравитационным. ...

6. ВЫВОДЫ

Исследован отклик на распространение АГВ в разных сортах атмосферных газов по данным спутниковых измерений на высотах 250–400 км. Из анализа экспериментальных данных следует, что в волновых вариациях концентраций разных газов систематически наблюдаются амплитудные и фазовые различия.

Показано, что вариации концентрации отдельного сорта газа можно представить в виде суперпозиции акустической и гравитационной составляющих. Акустическая составляющая, обусловленная градиентом давления, одинакова для всех газов и совпадает с акустической частью для общих вариаций плотности. Гравитационная составляющая отдельного газа состоит из общего для всех газов слагаемого, связанного с адиабатическим расширением – сжатием, а также индивидуальным слагаемым h / H_i . В результате суперпозиции указанных трех компонент получают результирующие вариации dn_i / n_i , которые в разных газах отличаются по амплитуде и фазе колебаний за счет отличия величин h / H_i .

По предложенной методике выделены акустические и гравитационные составляющие в АГВ, наблюдавшиеся на спутнике DE 2 над полярными областями. Получено хорошее соответствие теоретических представлений с экспериментальными данными.

Наблюдаемые на спутнике амплитудно-фазовые отличия в колебаниях разных газов позволяют установить ряд свойств АГВ, такие как вертикальное смещение, частоту, направление движения и плотность волновой энергии.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллектив лаборатории космических исследований Института... за предоставление компьютерного обеспечения. Выражаем признательность проф.Новикову А.А. за полезные дискуссии.

8. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, грант №207581.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Дикий Л.А.* Теория колебаний земной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 196 с. 1969.
- *Федоренко А.К.* Спутниковые наблюдения среднемасштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками // Космич. наука и технология. Т. 14. № 5. С. 65–73. 2008.
- *Dudis J.J., Reber C.A.* Composition effects in thermospheric gravity waves // Geophys. Res. Lett. V. 3. № 12. P. 727–730. 1976.
- *Eagleson P.S.* Physical composition of the oceans and lakes / Dynamic Hydrology/ EGU Reprint Series, 2. Katlenburg-Lindau, Germany: Copernicus Publications. P.67–68. 2003.
- *Felder M., Poll P., Joiner J.* Errors induced by ozone field horizontal inhomogeneities into nadir-viewing orbital backscatter UV measurements // J. Geophys. Res. V.112. D01303. doi:10.1029/2005JD006769. 2007.
- *Hines C.O.* Internal gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. V. 38. P. 1441–1481. 1960.
- <http://www.izmiran.ru/>
- *Iwata M., Matsumoto H., Kojima H., et al.* Computer experiments on the plasma wave generation in the vicinity of Earth's bow shock / Proc. 6th Intern. School . Symp. on Space Plasma Simulation Overview. Garching, Germany, 3–8 September 2001. N 4–6. 2001.
- *Monger J. W. H., Journeay J. M.* Guide to the geology and tectonic evolution of the southern Coast Mountains. Geol. Surv. Can., Ottawa, Ont. Open File Rep. 2490, 77 p. 1994.

Таблица 1. Оценки параметров сферически расходящейся волны, выделенные в период времени 05:30–06:30 UT 11 марта 2011 г.

Сектор	$\langle V \rangle$, м/с	σ_V , м/с	$\langle Az \rangle$, град	σ_{Az} , град
1	2660	400	330	20
2	2200	520	200	22
3	1370	440	270	29
4	1870	640	45	29
5	2080	900	290	24

Примечание. Угловые скобки означают усреднение по ансамблю.

к ст. Н.И.Иванова, И.П.Сидоров, Ф.В.Петров

“ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В
АТМОСФЕРЕ “

Таблица 2. Сравнение скоростей различных мод, полученных 11 марта 2011 г. разными методиками в период 05:00-07:30 UT

Тип моды	SADM – GPS (PRN18)	Дальность – время	Кластерный анализ
«Медленная» гравитационная мода	250±50 м/с наиболее вероятное значение 225–250 м/с	150–300 м/с	Не определялась
«Средняя» акустическая мода	590±200 м/с наиболее вероятное значение 625–650 м/с	700–1000 м/с	1370±440 м/с
«Быстрая» мода, обусловленная Релеевской волной	Не определялась	2200–2600 м/с	2200–2660 м/с

к ст. Н.И.Иванова, И.П.Сидоров, Ф.В.Петров

“ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ...

Подписи к рисункам к ст. Н.И.Иванова, И.П.Сидоров, Ф.В.Петров

“ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В
АТМОСФЕРЕ “

Рис. 1. Концентрации атмосферных газов в зависимости от UT и геомагнитной широты на витке 8296: *a*, *б*, *в* – исходные ряды измерений $n(O)$, $n(N_2)$, $n(Ar)$; *г* – относительные вариации концентраций этих газов в ночном секторе аврорального овала южного полушария.

Рис. 2. Гравитационная часть Gr вариаций плотности и вариации средней массы dm/m на витке 8209: *a* – южная полярная шапка, высота 240–270 км; *б* – северная полярная шапка, высота 350–370 км.

Рис. 3. Акустическая и гравитационная компоненты в относительных вариациях концентраций разных сортов газов.

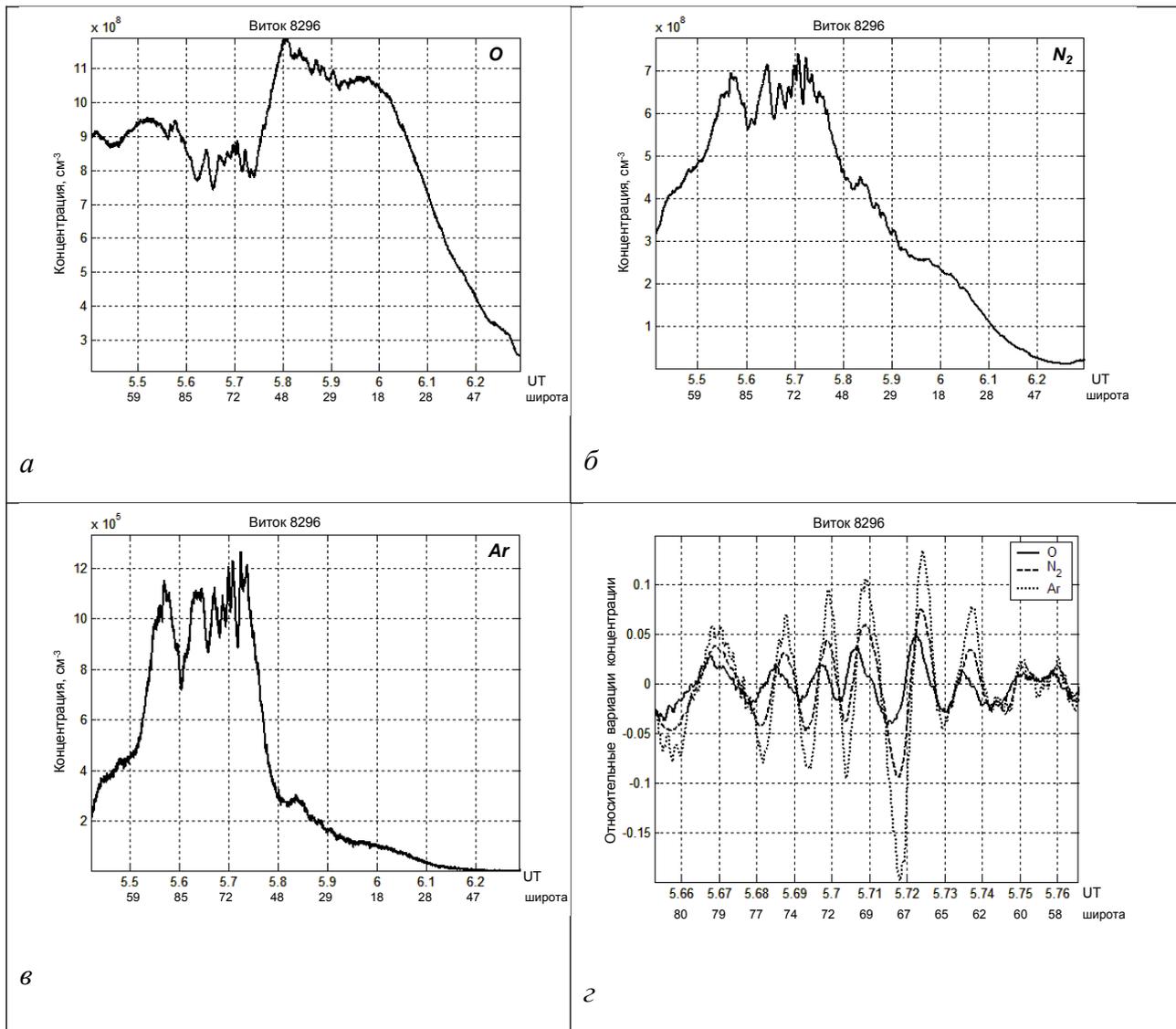


Рис. 1.

К ст. Н.И.Иванова и др. « ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ... »

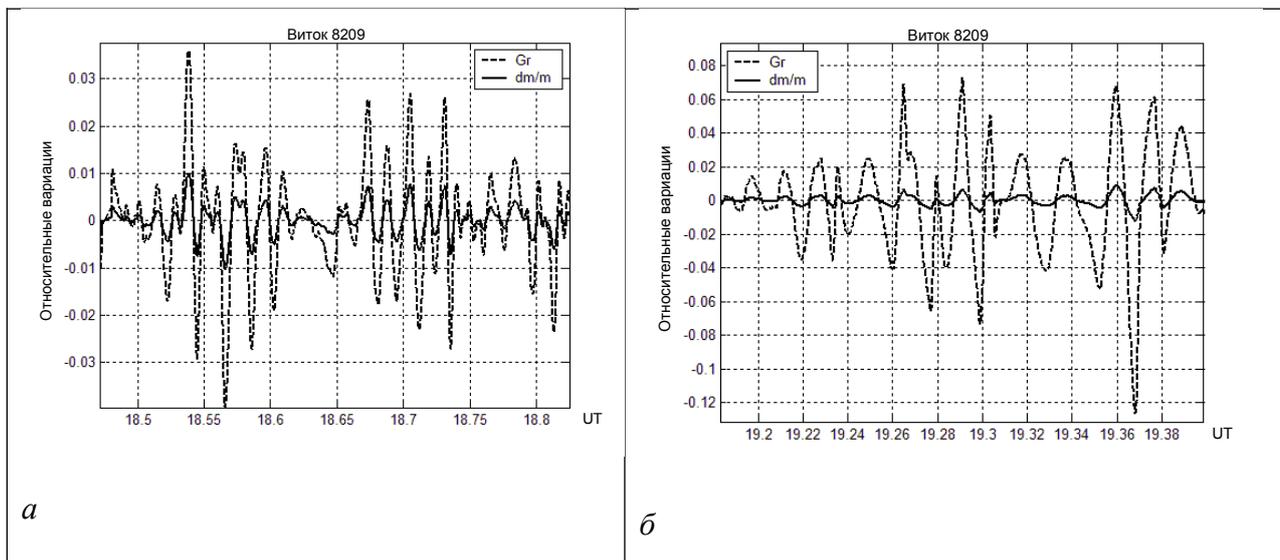


Рис. 2.

К ст. Н.И.Иванова и др. « ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ...»

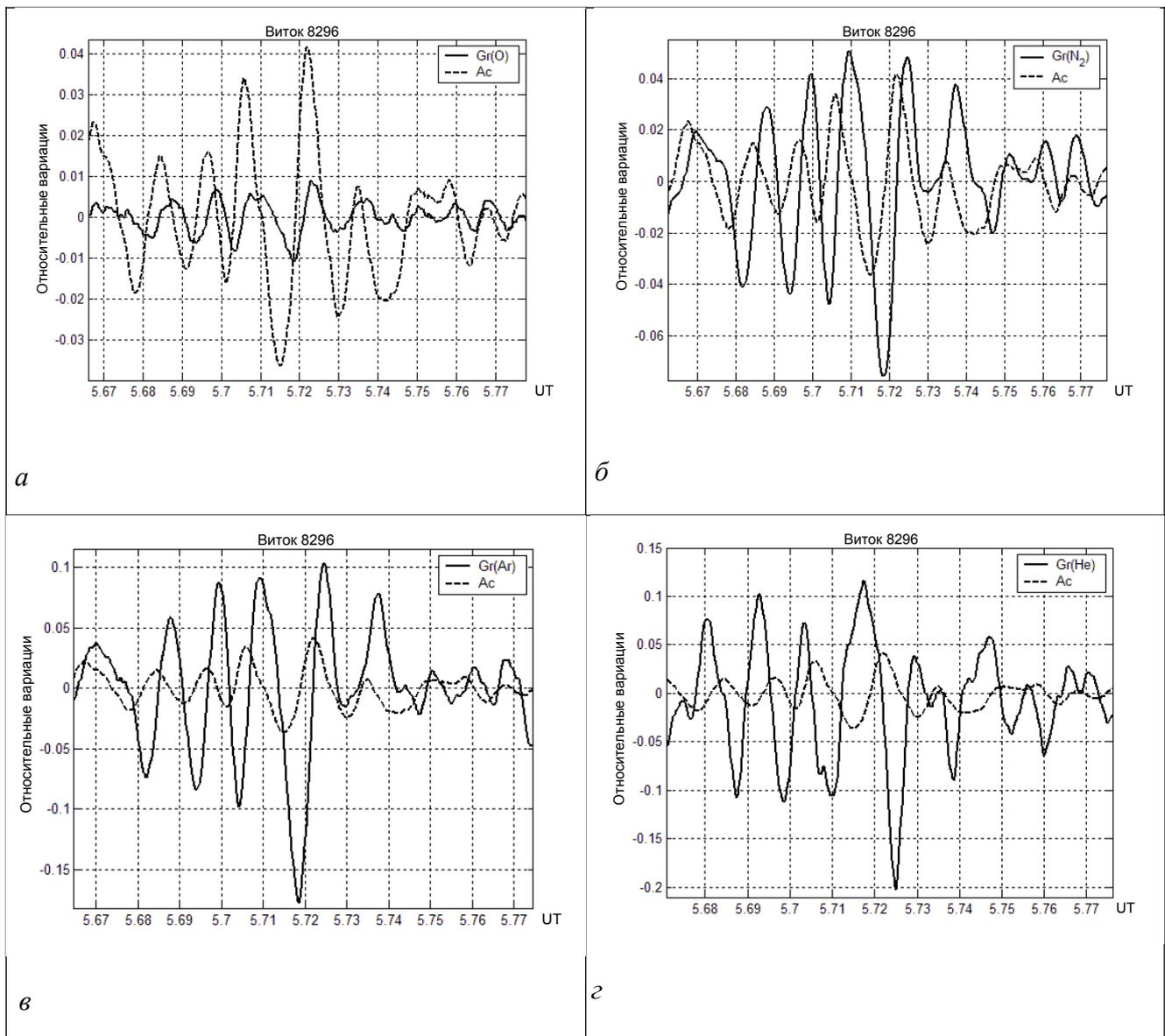


Рис. 3.

К ст. Н.И.Иванова и др. « ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ...»