

Г. В. Лизунов

Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины, Киев

КОММЕНТАРИЙ НА СТАТЬЮ О. Ф. ТЫРНОВА, Ю. П. ФЕДОРЕНКО, В. Л. ДОРОХОВА «ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ»

Это письмо в редакцию является комментарием на недавно опубликованную работу [1], посвящённую описанию акустико-гравитационных волн (АГВ) и перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) в термосфере Земли. Утверждения авторов работы [1] настолько далеки от действительности, что мы вынуждены выступить с их публичным опровержением. Наша мотивация обусловлена тем, что физики и радиофизики, не являющиеся узкими специалистами по теме статьи, и аспиранты, только готовящиеся стать такими специалистами, воспримут статью [1] как современный обзор, и в своих исследованиях примут за основу высказанные в ней ошибочные положения.

Статья [1] занимает 68 страниц журнального текста и логически состоит из нескольких разнородных частей: обзора литературы об АГВ (слабо увязанного с остальными частями), описания авторской модели АГВ-ПИВ, анализа наблюдений на радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, анализа ряда других наблюдений. (Следует отметить, что сами по себе экспериментальные результаты представляют интерес и, если их очистить от лишних сущностей, заслуживают отдельной публикации). В целом статья

написана длинно, не сфокусированно, изобилует неточными, спорными и претенциозными утверждениями, что превращает изучение статьи в поиск крупиц информации «в тоннах словесной руды».

Стержнем работы является парадоксальная авторская концепция распространения АГВ, состоящая в том, что гребни АГВ движутся с различными априори заданными скоростями: первый гребень со скоростью около 11 км/с, второй — 1 км/с, третий — 0.5 км/с и т. д. вплоть до 8-го гребня — 0.09 км/с. Данный подход противоречит основам теории колебаний и волн, поскольку речь идёт не о том, что спектральные составляющие АГВ имеют разные фазовые скорости (дисперсия), а что фиксированные скорости приписываются разным гребням волны (см. с. 10 в [1]). Картина поля АГВ затем рассчитывается как результат простого кинематического перемещения волновых гребней от источника в точку наблюдения. Авторы не пытаются оправдать свой подход физически, а преподносят его в качестве «эмпирической модели», как если бы никакой теории АГВ не существовало. Без математики, без использования представлений о дисперсионном уравнении, фазовых и групповых скоростях, о лучевых траекториях волн в реальной атмосфере — вопросах, разрабатываемых уже более полстолетия, — такая модель выглядит слишком упрощённой.

Более того, теория АГВ основывается на огромном экспериментальном материале, накопленном на протяжении космической эры. Наряду с апробированными данными специалистам известны и «апокрифические» результаты, достоверность которых вызывает сомнение, и которые, в конечном итоге, остались за рамками современной парадигмы АГВ-ПИВ. И вот сюрприз, эмпирическая модель [1] практически не использует данные первого типа (т. е. такие, которые установлены надёжно), а в основных своих моментах калибруется по данным второго типа (большой частью опубликованным в 1960-х годах несколькими группами авторов, занимавшихся наблюдением ионосферных откликов на воздушные ядерные взрывы). Наибольшее неприятие вызывают тезисы о скорости распространения АГВ 11 км/с и гигантских амплитудах этих волн до 80 % возмущения плотности нейтральной атмосферы.

Во всём диапазоне ионосферных высот заряженные компоненты составляют малую добавку к нейтральному газу (так, в максимуме плотности ионосферы, на высоте 250...300 км, ионизация составляет менее 0.1 %). Поэтому, при распространении АГВ, колебания нейтральных частиц вовлекают в своё движение ионы, но не наоборот. Сильнейшие плазменные неоднородности, которые действительно наблюдаются в ионосфере и генерация которых обуславливается электродинамическими процессами (например, плазменные баблы) ни в коем случае не есть возмущениями нейтральной среды. Из многочисленных наблюдений известно, что амплитуды АГВ не превышают 10 — 20 %, а обычно много меньше. Больше бывает только в самих источниках энерговыделения — дугах полярных сияний, метеорах, тех же ядерных взрывах.

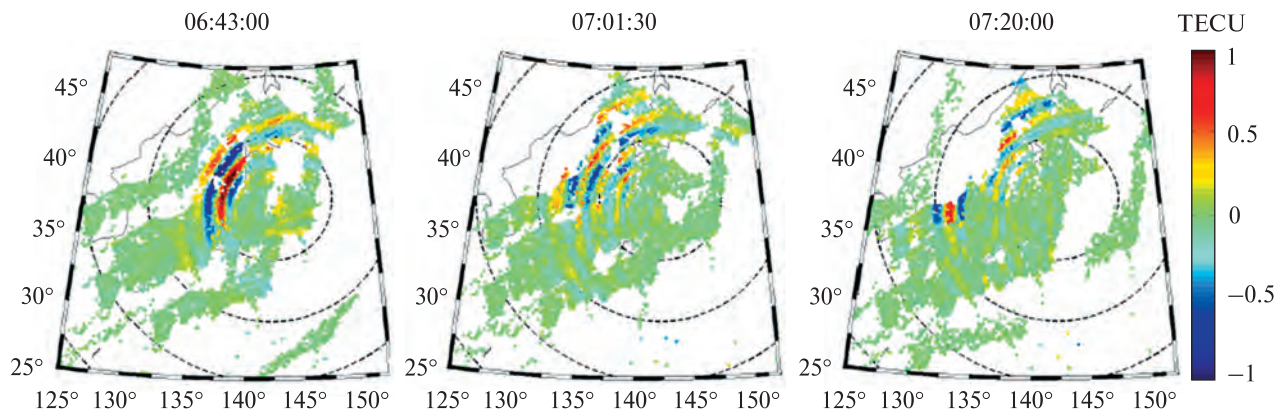
Скорости распространения АГВ, во всяком случае, не превышают скорости звука в термосфере 0.6—0.9 км/с (в зависимости от солнечной активности). С другой стороны, скорости МГД-волн превышают 1000 км/с. Науке неизвестны типы колебаний околоземной космической среды, скорости которых лежат между указанными значениями (во всяком случае, если говорить о диапазоне частот РС5, специфичном для АГВ).

А вот внутри Земли скорости упругих волн, в зависимости от глубины, составляют 6—13 км/с (Р-волна), 4—6 км/с (S-волна), 3 — 4 км/с (поверхностные типы волн). Также известно, что сейсмические колебания посредством генерируемого в атмосфере инфразвука «тянут» за собой ионосферный отклик. Не станем утверждать, но, возможно, на этом пути можно найти правильное объяснение сверхзвуковых скоростей распространения переднего фронта ионосферных возмущений, указанных в [1].

И ещё одно не замечание, а скорее ощущение: авторы пытаются выдать желаемое за действительное. Экспериментальные результаты, на которые они ссылаются, недостаточно точны и однозначны. В то же время за кадром остаются многочисленные релевантные наблюдения АГВ-ПИВ.

Чтобы приведенная критика не выглядела абстрактно, опишем здесь результаты регистрации пространственно-временной динамики ПИВ над Великим восточно-японским землетрясением (11 марта 2011 г., эпицентр около о. Хонсю, $M = 9.0$) [2]. Сравнение работ [1] и [2] кажется удачным, поскольку на пространственных масштабах ПИВ эпицентральная область даже столь мощного землетрясения выступает квазиточечным источником энерговыделения, аналогичным взрыву.

Работа [2] продолжает серию многочисленных наблюдений ионосферных откликов на приземные источники энерговыделения путём мониторинга полного электронного содержания ионосферы (ПЭС). Территория Японии покрыта плотной сетью GPS-приёмников, в поле зрения которых в момент землетрясения находилось одновременно более 10 спутников GNSS. По данным GPS были составлены карты ПЭС, которые позволили с высоким временным и пространственным разрешением проследить картину возникновения и распространения ионосферного возмущения на расстояниях вплоть до 1500 км от эпицентра. Поскольку значение ПЭС эффективно формируется в области максимума ионосферной концентрации (в данном случае около высоты 250 км), фактически регистрировалась структура горизонтального среза ионосферы на указанной высоте. В интернете размещена



Фрагмент анимации распространения ионосферного возмущения от Великого восточно-японского землетрясения [2, 3]

анимация данных наблюдений [3], фрагмент которой представлен на рисунке. Измерены количественные параметры ПИВ (спектр частот, горизонтальные длины волн, скорости распространения), и на этой основе установлены механизмы генерации ПИВ.

Как видно из рисунка, от эпицентра землетрясения расходятся концентрические возмущения ПЭС. Амплитуды возмущений составляют до 1 TECU (т. е. всего несколько процентов величины ПЭС). Передний фронт распространяется со скоростью 3.5 км/с, что интерпретируется как отклик ионосферы на бегущую по поверхности земли сейсмическую волну. Второй фронт распространяется со скоростью около 1 км/с. Фрагмент анимации распространения ионосферного возмущения от Великого восточно-японского землетрясения [2, 3] — это результат воздействия на ионосферу акустического (инфразвукового) импульса от главного толчка землетрясения. Затем следует длинный цуг АГВ в диапазоне фазовых скоростей 170 — 230 м/с, источником которого являются волны цунами. О «скачковом» и «волноводном» механизмах возбуждения АГВ, фигурирующих в [1], речь не идёт.

Картина волн, представленная на рисунке, внешне похожа на представленную в критикуемой нами работе [1], но имеет кардинально иной смысл и другие количественные характеристики. (Так, различными скоростями распространения характеризуются не последующие фазы волнового процесса, а передние фронты различных процессов).

Резюмируя, мы считаем, что в работе [1] построена не модель ПИВ, а скорее визуальное описание, «фоторобот» ПИВ, причём на ненадёжном наблюдательном материале. Параметры фоторобота подогнаны под эксперименты с воздушными ядерными взрывами и уже поэтому, независимо от степени своей достоверности, имеют мало общего с природной картиной активности термосферы-ионосферы. Чтобы получить представление о последней, рекомендуем читателю ознакомиться с экспериментальными эпюрами, представленными в [4] (глобальная морфологическая структура поля АГВ), [5] (двумерная горизонтальная структура и динамика волнового пакета АГВ-ПИВ над Харьковом) и [6] (типичные формы ПИВ).

1. *Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Дорохов В. Л.* Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений // *Космічна наука і технологія*. — 2016. — 22, № 5. — С. 3—70.
2. *Rolland L. M., Lognonn'e P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H.* The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth Planets Space*. — 2011. — 63, N 7. — P. 853—857.
3. *Rolland et al.* Collaboration IPGP-GSI, 2011. — Интернет ресурс.
4. *Скоруход Т. В.* Морфологическая структура и возможные источники АГВ в ионосфере // *Космічна наука і технологія*. — 2011. — 17, № 2. — С. 61—67.
5. *Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Y. M., Paznukhov V. V., Reinisch B. W., Foster J. C., Erickson P.* Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics

of TIDs // *Radio Sci.* — 2003. — **38**, N 6. — P. 1102. — doi:10.1029/2002RS002861

6. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Геомагнетизм и аэрoномия.* — 2006. — **46**, № 2. — С. 193—208.

REFERENCES

1. Tyrnov O. F., Fedorenko Yu. P., Dorohov V. L. Spatio-temporal dynamics of traveling ionospheric disturbances. *Kosm. nauka tehnol.*, **22** (5), 3—70 (2016) [in Russian].
2. Rolland L. M., Lognonn'e P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the

Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space.*, **63** (7), 853—857 (2011).

3. Rolland et al. Collaboration IGP-GSI, 2011. — Internet resource.
4. Skorokhod T. V. Morphologic structure and possible sources of the AGW generation in ionosphere. *Kosm. nauka tehnol.*, **17** (2), 61—67 (2011) [in Russian].
5. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Y. M., Paznukhov V. V., Reinisch B. W., Foster J. C., Erickson P. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs. *Radio Sci.*, **38** (6), 1102 (2003). — doi:10.1029/2002RS002861
6. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Volnovye processy v ionosfere v spokojnyh i vozmushhennyh usloviyah. 1. Rezul'taty nabljudenij na har'kovskom radare nekogerentnogo rassejanija. *Geomagnetizm i aeronomiya*, **46** (2), 193—208 (2006) [in Russian].