

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.052>

УДК 550.388: 621.396.98: 629.783

Ю. П. Федоренко

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков

ОТВЕТ НА КОММЕНТАРИЙ Г. В. ЛИЗУНОВА ПО СТАТЬЕ «ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ»

Выполнен детальный разбор замечаний Г. В. Лизунова, изложенных в его комментарии на нашу работу «Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений», опубликованную в журнале «Космічна наука і технологія». — 2016. — 22, № 5. Показана глубокая ошибочность суждений автора комментария относительно вопросов обсуждаемой статьи. Иллюстрируются ключевые шаги экспериментальных и теоретических исследований, на основе которых нам удалось предложить радикально новый подход к моделированию процессов зарождения и распространения перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Теоретически и экспериментально доказано, что акустико-гравитационные волны (АГВ) на ионосферных высотах могут распространяться со скоростями, в несколько раз превышающими скорость звука. Относительные амплитуды АГВ-ПИВ часто составляют 40—100 %.

Ключевые слова: модель, АГВ-ПИВ, сверхзвуковые скорости, относительные амплитуды возмущений, пространственные и временные квазипериоды

ВВЕДЕНИЕ

Цель обсуждаемой статьи состоит в развитии разработанной нами динамической глобальной модели АГВ-ПИВ [31], названной *Ukraine-2013*. Статья сфокусирована на представлении важных (полученных впервые) результатов исследования высокоскоростных динамических процессов, какими являются АГВ-ПИВ, важных не только с научной точки зрения, но и с точки зрения практического применения.

Модель подробно описана в разделе 2 «Описание модели зарождения и распространения АГВ-ПИВ». Все её параметры основываются на результатах теоретических и экспериментальных

исследований семи десятилетий, подробно разъяснены в подразделе «Параметры АГВ-ПИВ полуэмпирической модели». Обоснование выбора этих параметров изложено в разделе 3 «Выбор параметров модели». Направления последующей модернизации модели *Ukraine-2013* кратко даются в подразделе «Пути совершенствования модели». Нас удивляет, почему оппонент в тексте статьи не смог найти подробное обоснование выбора параметров модели, разъяснение нашего физического подхода к её построению и дальнейшей модернизации. Ведь местоположение описания этих важных вопросов очевидно из указанных выше названий разделов и подразделов.

Далее приводятся ответы на замечания, изложенные в комментарии. Для их аргументации ис-

© Ю. П. ФЕДОРЕНКО, 2017

пользуются ссылки в квадратных и круглых скобках. Первые соответствуют списку литературы из обсуждаемой работы, а вторые — это литература из списка, приведенного в конце настоящей статьи. Ссылки в квадратных скобках свидетельствуют о том, что детальные обоснования и разъяснения параметров модели *Ukraine-2013* на основе литературных источников были приведены ещё в рецензируемой статье, а ссылки в круглых скобках подтверждают ошибочность суждений оппонента дополнительными публикациями.

АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ КОММЕНТАРИЯ

Комментарий к нашей статье изобилует ошибочными утверждениями, неточностями, искажениями текста статьи, неконкретными формулировками. Неточности начинаются с самого начала текста комментария: «...в термосфере». Термин «термосфера» в нашей статье вообще не используется. В своих исследованиях мы рассматриваем все области атмосферы. Мы не исключаем из рассмотрения ни одной области потому, что возбуждение АГВ может происходить на любой высоте над поверхностью Земли (ядерными и обычными взрывами, стартами ракет, полетами космических станций, землетрясениями, вулканами, болидами, волнами в океане, высыпаниями частиц и др.).

Автор комментария отмечает, что наши «экспериментальные результаты представляют интерес и, если их очистить от лишних сущностей, заслуживают отдельной публикации», при этом оппонент почему-то забывает уточнить, что в его понимании означает «очистить от лишних сущностей» хорошие экспериментальные данные.

В доказательство своей критики автор комментария приводит (как позитивный образец) пересказ фрагмента статьи Rolland (2011). Однако, сравнивая эту работу с нашей, оппонент сам себе противоречит и дает положительную оценку нашей работы и предложенной нами модели, он пишет: «Картина волн, представленная на рисунке, внешне похожа на представленную в критикуемой нами работе...». То есть наша модель работает, и результаты экспериментальных исследований (Rolland, 2011) еще раз подтверждают адекватность модели.

Результаты экспериментальных исследований (Rolland, 2011), приведенные в комментариях, подтверждают адекватность модели:

- «Фронт волны в горизонтальной плоскости для шарообразных (точечных) источников представляет собой окружность...» — см. подраздел «Параметры источника» в статье и рис. 1 в комментарии.

- АГВ порождают ПИВ с наибольшей амплитудой вдоль направления распространения, для которого проекция вектора напряжённости геомагнитного поля на волновой вектор АГВ имеет максимальную величину (см. формулу (1) и текст к ней на стр. 11 статьи).

- В табл. 1 статьи модельные скорости распространения экстремумов цуга АГВ-ПИВ указаны в такой последовательности: 11.3, 1.15, 0.68, 0.47, 0.35, 0.28, 0.24, 0.2, 0.18, 0.17 км/с (здесь приведены округлённые значения). В комментарии, сославшись на (Rolland, 2011),

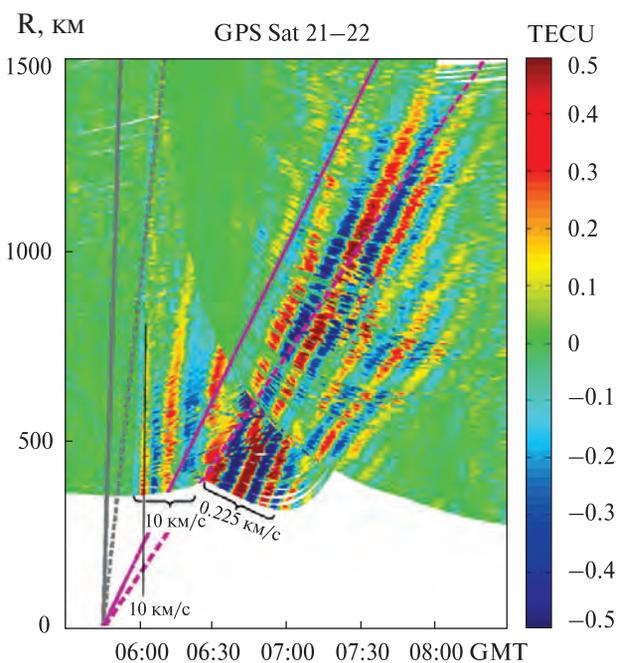


Рис. 1. Диаграмма дальность — время значений полного электронного содержания, полученная с применением спутников GPS 21 и GPS 22. Использовались GPS-приёмники GEONET. Данные зарегистрированы после Великого восточно-японского землетрясения 11 марта 2011 г., эпицентр которого находился около о. Хонсю в Японии, магнитуда 9.0 (Rolland et al., 2011)

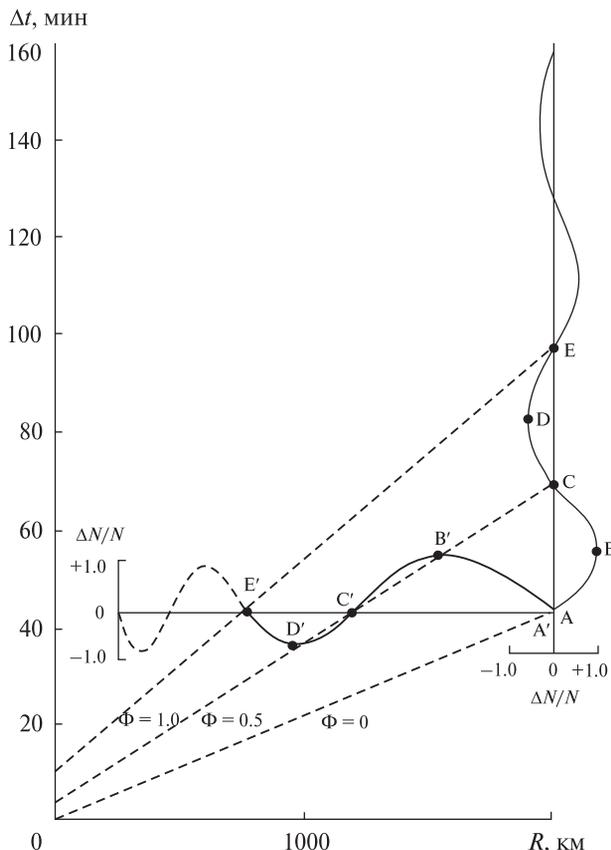


Рис. 2. Преобразование временных относительных флуктуаций электронной концентрации $\Delta N/N(t)$, полученных на измерительном пункте ИП, расположенном на фиксированном расстоянии от места ядерного взрыва, в пространственные флуктуации $\Delta N/N(R)$. Здесь R — изменяющееся расстояние до ядерного взрыва. Геомагнитная широта ИП составляет около $25^\circ N$, изменение R происходит вдоль геомагнитного меридиана, проходящего через место взрыва. Штриховыми короткими линиями показаны ожидаемые части графиков, вычисленные по эмпирической зависимости, сплошные линии соответствуют экспериментальным данным [23]

значения скоростей ошибочно перечисляются в следующем порядке: 3.5, 1, 0.23–0.17 км/с. Однако в работе (Rolland, 2011) в действительности приводятся скорости ~ 3 , ~ 1 , 0.255 ± 0.01 км/с. По данным Fig. 2(b) из работы (Rolland, 2011) на рис. 1 нами обозначена (не указанная авторами) скорость перемещения экстремумов цуга со значением около 10 км/с. Здесь же отмечены экстремумы со скоростью перемещения ~ 0.225 км/с.

Таким образом, на Fig. 2(b) из (Rolland, 2011) наблюдается ряд скоростей: ~ 10 , ~ 3 , ~ 1 , 0.255 , 0.227 км/с. Значения этого ряда очень близки к модельным значениям скоростей (см. выше), что дополнительно подтверждает адекватность нашей модели по новым экспериментальным данным. Модельные значения скоростей (0.2, 0.18, 0.17 км/с) хвостовых экстремумов цуга (из-за их малых амплитуд) в работе (Rolland, 2011) не были зарегистрированы, что вызвано низкой чувствительностью использованного метода диагностики ПИВ.

- В работе (Rolland, 2011) утверждается, что первый тип волн, распространяющийся со скоростью 3 км/с (что превышает скорость звука на высотах 250–300 км более чем в три раза), скорее всего порождён поверхностными волнами Рэлея, второй тип волн (~ 1 км/с, что также превышает скорость звука) обусловлен акустической волной, принадлежащей к высокочастотной границе АГВ, а третий тип волн является свободно распространяющимися АГВ, в нашей статье этот тип именуется также скачковым.

- Реальные экспериментальные данные всегда включают в себя влияние большого количества различных геофизических факторов, однако даже невооруженным глазом видно хорошее совпадение волновых форм на Fig. 3(b) в работе (Rolland, 2011) и на рис. 2 в нашей статье, на котором изображен цуг возмущения, положенный в основу нашей модели АГВ-ПИВ.

Рецензент утверждает, что «скорости распространения АГВ, во всяком случае, не превышают скорости звука в термосфере 0.6–0.9 км/с (в зависимости от солнечной активности)».

Сверхзвуковые скорости горизонтального и вертикального перемещения экстремумов цуга АГВ-ПИВ наблюдаются экспериментально и объясняются теоретическими моделями. Ниже приведены значения сверхзвуковых скоростей экстремумов цуга АГВ-ПИВ для различных источников возмущений, взятые из ряда публикаций.

- После магнитных бурь: 3.391 ± 0.237 , 2.12 ± 0.488 , 1.769 ± 0.336 (Pradipta et al., 2014); 1.4, 1.342, 1.222 км/с (Афраймович и др., 2004а, 2004б, 2005).

- После наземного взрыва: 1.78–1.28 км/с (Daniels et al., 1960); 1.6 км/с (Алебастров и др., 1985).

- После высыпания энергичных частиц в магнитосферный касп: 2—1 км/с [64] (стр. 540, первый абзац).

- После землетрясений: ~10, ~3, ~1 км/с (Rolland, 2011); 6.2, 4.5, 3.9 и 3.5 км/с (Nishitani et al., 2011); 3, 2.6, 2.2 км/с (Ясюкевич и др., 2015; Ясюкевич и др., 2012; Перевалова, 2014; Перевалова и др., 2012; Перевалова и др., 2016); 3.2, 3.07; 2, 1.2 км/с (Jin et al., 2015; Jin et al., 2014); 2.5 и 1.7 км/с (Heki et al., 2006); ~3.3 км/с (Galvan et al., 2012; Occhipinti et al., 2013); 3.2, 2, 1.2 км/с (Jin et al., 2015); 2.5 и 1.7 км/с (Heki et al., 2006); 3.457 км/с (Tsugawa et al., 2011); 2.31 км/с (Choi et al., 2016); 1.67, 1.44, 1.27 км/с (Chen et al., 2011).

- В монографии (Гершман, 1974) на основе теоретического анализа утверждается, что АГВ, распространяющиеся вертикально, всегда будут сверхзвуковыми (с. 106, предпоследний абзац).

- В разделе «Ключевые теории АГВ-ПИВ» с использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований доказывається, что горизонтальная скорость ПИВ может превышать скорость звука в несколько раз, и составлять около 11 км/с.

Относительная амплитуда АГВ-ПИВ часто составляет 40—100 %. Оппонент искажает текст статьи, когда пишет о неприятии тезиса об амплитуде АГВ: «... до 80 % возмущения плотности нейтральной атмосферы». В статье значения «70...80 %» приведены не для нейтральной компоненты атмосферы, а для относительной амплитуды A_d возмущения электронной концентрации. Величины такого порядка мы находим во многих публикациях. В работе (Bristow et al., 1995) амплитуда ПИВ составляла $A_d = 40 %$, в [22] — 41—68 %, в (Афраймович и др., 2005) — 50 %, в [23] амплитуда ПИВ изменялась от 30 до 100 %, а по экспериментальным данным из обсуждаемой статьи (которые оппонент не опровергает) — $A_d \sim 40—100 %$ (см. рис. 23, 26 — 32 и текст к ним). При этом отмечаем, что в настоящее время большинство геофизиков полагает, что A_d пропорциональна относительной амплитуде АГВ (см., например: Афраймович и др., 2004; 2005).

Автор комментария искажает текст и положения статьи. Рассуждая о модели, оппонент,

на наш взгляд, допускает ошибки в ее оценке, забывает о назначении, целях и основах моделирования. Как известно, в соответствии с теорией моделирования, модель должна отображать свойства объекта-оригинала, *наиболее существенные с точки зрения цели* исследования. На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований учёных прошлого века (см. ниже) нам удалось разработать достаточно простую в математическом описании модель. Простота модели является её достоинством, а не недостатком, и позволила нам приблизиться к созданию динамической модели, пригодной для оперативного расчёта долгосрочных прогнозов. Рецензент же даже не упоминает об адекватности нашей модели, его беспокоит лишь то, что на его взгляд «такая модель выглядит весьма примитивно».

- Оппонент называет нашу модель эмпирической, в то время как она является полуэмпирической (такие модели еще называют гибридными). О том, что модель полуэмпирическая, отмечено в *аннотации* и далее *множественно* в тексте статьи. Разработанная нами гибридная модель позволяет сочетать высокую точность и надежность эмпирических данных с возможностью теоретического расчета как регулярных параметров N , так и текущих характеристик перемещающихся ионосферных возмущений.

- Оппонент рассматривает упругие волны внутри Земли, которые никакого отношения к обсуждаемой статье не имеют. Максимальная рассматриваемая в нашей модели скорость — это скорость распространения лидирующей части цуга возмущения, равная 11.3 км/с.

- Автор рецензии «поправляет» нас: «...при распространении АГВ, колебания нейтральных частиц вовлекают в своё движение ионы, но не наоборот». Однако мы не утверждаем обратное, в статье мы не оспариваем эту концепцию, мы о ней даже не упоминаем.

- В комментарии отмечается, что «стержнем работы является парадоксальная авторская концепция распространения АГВ, состоящая в том, что гребни АГВ движутся с различными априори заданными скоростями...». Отметим, что ещё в аннотации статьи сказано, что не только гребни,

но и любой фрагмент цуга АГВ перемещается с постоянной горизонтальной скоростью. Заметим, что парадоксальность концепции не означает её ошибочность. Новый физический эффект часто вначале воспринимается как парадокс.

• Оппонент пишет: «...эмпирическая модель [1] ... калибруется по данным большей частью опубликованным в 1960-х годах несколькими группами авторов, занимавшихся наблюдением ионосферных откликов на воздушные ядерные взрывы», а также «Параметры фоторобота (имеется в виду модель — авторы) подогнаны под данные экспериментов с воздушными ядерными взрывами...». В статье же чётко в разделе 3. Выбор параметров модели (с. 20, колонка правая, последний абзац) указывается, что параметры полуэмпирической модели адаптируются (калибруются) по совершенно иным данным: по ионосферным откликам на извержения вулкана *St. Helens* 16 мая 1980 г. При этом модель возмущения изотермической атмосферы точечным источником, предложенная в [45, 66], адаптирована не авторами, а в работе [53]. Авторы статьи лишь использовали параметры уже существующей вышеназванной модели, адаптированной по высокоточным данным, полученным в [53].

• Сравнивая нашу работу с образцовой статьёй (Rolland, 2011) и отмечая, что в ней, в отличие от нашей работы, не идет речь о «скачковом» и «волноводном» механизмах возбуждения АГВ», оппонент неправ в использовании терминов, и механизмы распространения (скачковый и волноводный) называет механизмами возбуждения. При этом скачковый способ распространения АГВ вопреки утверждению оппонента упоминается (см. выше) в статье (Rolland, 2011). В нашей статье механизмам распространения посвящен раздел «Гипотезы механизмов распространения АГВ-ПИВ».

Теоретические и экспериментальные исследования, на которых основана обсуждаемая модель, надёжны. Наша модель *Ukraine-2013* построена с учетом данных [45, 53, 54, 66]. Авторы статей [45, 66] Лиу и Ех (Liu С. Н., Yeh К. С.) разработали общепризнанную в настоящее время модель возмущения атмосферы точечным источником.

Параметры этой модели, адаптированные по экспериментальным данным, успешно использованы в работах [53, 54]. В нашей статье (уже адаптированная к реальным условиям) модель возмущения атмосферы применена для разработки динамической модели АГВ-ПИВ. Первый соавтор работ [53, 54] Робертс (Roberts D. Н.) в настоящем — известный астрофизик США. Его подход к разработке упрощённых моделей среды распространения АГВ-ПИВ, предложенный в работе [53], успешно применён в его дальнейших исследованиях. Второй соавтор работы [53] Клобучар (Klobuchar J. А.) — ведущий геофизик США 20 века. В работе [53] отмечается, что перед публикацией материалы статьи обсуждались с известными учёными Ех, Роу (Row V.), Еванс (Evans J. V.), Франсис (Francis S. Н.), которые являются признанными авторитетами в современной геофизике, теоретических и экспериментальных исследованиях АГВ-ПИВ. Ссылки на их труды имеются в большинстве статей, посвящённых серьёзным исследованиям АГВ-ПИВ. Более детально их вклад в исследование АГВ освещён в следующем разделе.

Оппонент утверждает, что результаты статей [45, 53, 54, 66], на которых мы основываем модель *Ukraine-2013*, являются апокрифическими. Напомним читателям, что апокрифы — это древние произведения с библейским сюжетом, содержащие отступления от официального верования и потому отвергнутые церковью (Словарь русского языка, 1985). Нам кажется, что оппонент единственным сакраментальным произведением считает опубликованную в 1960 г. работу Хайнса (Hines С. О.) [36], именуя все последующие исследования, её развивающие и дополняющие, апокрифическими. Но у этой пионерской, безусловно талантливой работы, имеются и недостатки, они отмечаются в следующем разделе. Оппонент не пытается проверить результаты, полученные по нашей «неправильной» модели (по данным, взятым из доступных литературных источников), а многочисленные результаты верификации, приведенные в статье, просто игнорирует. Так, например, данные важнейших ядерных экспериментов, описанных в работах [1, 23, 26, 39, 46, 48, 55], оппонент считает недостовер-

ными, новые геофизические эффекты, надёжно выявленные в упомянутых работах, он именует парадоксальными, апокрифическими.

Два примера сумбурных замечаний, приведенных в комментарии.

- Читаем: «Параметры фоторобота подогнаны под данные экспериментов с воздушными ядерными взрывами, и уже поэтому, независимо от своей достоверности, имеют мало общего с природной картиной волновой активности термосферы-ионосферы». Пожалуй, практически в каждой статье по затронутой теме повторяется, что АГВ-ПИВ порождаются различными антропогенными и естественными источниками локального энерговыделения. Автор же рецензии безапелляционно утверждает, что, например, воздушный ядерный взрыв и высыпание энергичных протонов в магнитосферные каспы произведут нечто существенно разное. При этом оппонент еще и неправильно утверждает, что наша модель калибруется по данным «экспериментов с воздушными ядерными взрывами». Мы свидетельствуем о том, что оппонент намеренно внёс упомянутое искажение в свой отзыв, если бы он указал, что калибровка выполнялась по данным, полученным после взрыва вулкана (естественный источник возмущений), то пришлось бы исключить его надуманное замечание относительно достоверности калибровочных данных и что они «имеют мало общего с природной картиной волновой активности термосферы-ионосферы».

- Автор комментария ошибочно утверждает, что в нашей статье рассматриваются «последующие фазы волнового процесса». А в эталонной для него статье (Rolland, 2011) «различными скоростями характеризуются не фазы волнового процесса, а передние фронты различных волновых процессов». Мы же (в действительности) рассматриваем скорости экстремумов единого волнового процесса, которые в статье (Rolland, 2011) в качестве гипотезы полагаются передними фронтами «различных волновых процессов». В разделе 3 мы доказываем, что наши заключения имеют статус теории, а не гипотезы. Наш подход к исследуемому явлению позволил впервые предложить модель АГВ-ПИВ, которая является общей, единой для крупномасштабных и

среднемасштабных неоднородностей атмосферы. При таком подходе излишне привлекать гипотетические передние фронты «различных волновых процессов».

Если наша модель верно описывает пространственно-временную динамику АГВ-ПИВ, но ошибочна только потому, что непонятна автору комментария, то с этим можно было бы примириться. Однако для читателей журнала «Космическая наука и технология» более подробно, чем это было сделано в статье, изложим парадигму исследований АГВ-ПИВ, которая позволила нам разработать адекватную модель *Ukraine-2013*, выявить и объяснить важнейшие геофизические эффекты, которые не поняты автором комментария.

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕОРИИ АГВ-ПИВ

Первая попытка привлечь уравнения геофизической гидродинамики к объяснению природы ПИВ была предпринята Мартын [48]. Предложенная им идея порождения ячеистых волн была очень оригинальной, теоретический анализ выполнен на высоком профессиональном уровне. Поэтому для геофизиков его работа явилась мощным толчком к поиску адекватного решения. Хайнс [36] первым решил в линейном приближении для недиссипативной среды уравнения геофизической гидродинамики, описывающие распространение волн в атмосфере. Он получил дисперсионное уравнение (и поляризационные соотношения к нему), которое, в частности, описывает внутренние гравитационные волны. Из этого уравнения следует, что на больших расстояниях от источника возбуждения (зарождения) АГВ возмущение представляет собой волновой процесс, который характеризуется временным (T) и пространственным (L) периодами, определяемыми свойствами среды распространения.

Вместе с тем наблюдаемые в эксперименте квазигармонические пространственные и временные изменения N в ПИВ эта гипотеза не объясняет (см., например, рис. 2 [23] и 3 [53]). Хайнс для получения аналитического решения уравнений геофизической гидродинамики использовал предположение о том, что относительные возмущения

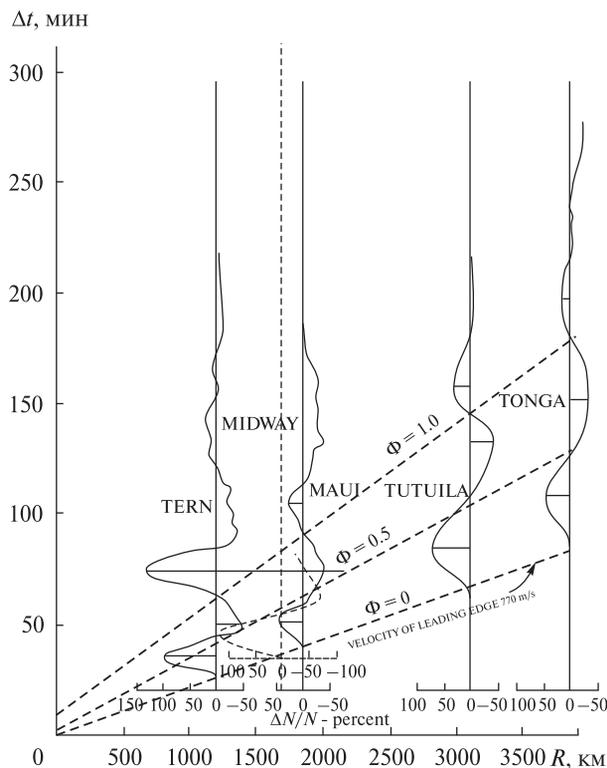


Рис. 3. Квазиволновые временные флуктуации $\Delta N/N(t)$, полученные по f_0F_2 при помощи ионозондов, расположенных на пяти различных расстояниях от места низковысотного ядерного взрыва [23]. На рисунке указаны названия пунктов, в которых располагались ионозонды

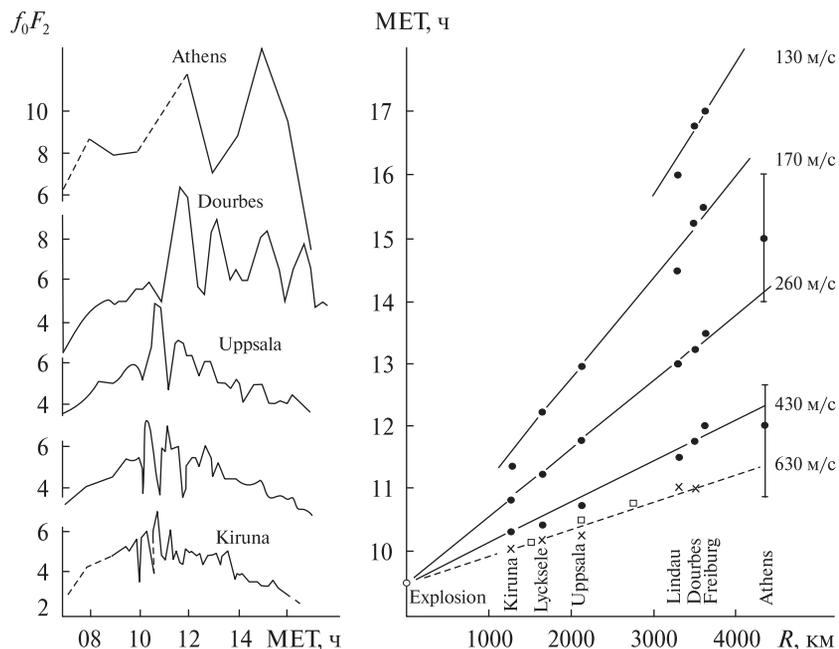
параметров среды распространения в АГВ много меньше единицы. Без этого ограничения получить его знаменитое (и любое другое) дисперсионное уравнение невозможно. Однако упомянутое условие для глобально наблюдаемых АГВ-ПИВ практически никогда не выполняется. А для АГВ-ПИВ с вертикальной составляющей это условие нарушается всегда ввиду экспоненциального убывания плотности атмосферы с высотой. Такой рост амплитуды АГВ указывается во многих работах, для примера приведём две из них [4, 30]. Коллективное замалчивание нарушения отмеченного условия объясняется желанием получить аналитические решения уравнений геофизической гидродинамики, которые, как ни странно, удовлетворительно описывают многие (но далеко не все) экспериментальные результаты. Парадоксальность этого факта отмечается в обзоре нашей статьи. Так

как работа Хайнса и его последователей не объясняет все экспериментальные данные, использует невыполнимые приближения, то теоретические рассуждения, описывающие распространения АГВ, пока имеют статус не теории, а гипотезы.

Недостатки гипотезы Хайнса особенно ярко проявились при анализе атмосферных возмущений, вызванных ядерными экспериментами. Эти данные наиболее надёжны и документированы. Полной неожиданностью для исследователей явились результаты наблюдений возмущений критической частоты f_0F_2 ионосферы, полученные в измерительных пунктах (ИП), расположенных на разных расстояниях (R) от места самого мощного в истории ядерного взрыва. Взрыв с эквивалентной энергией 58 МТ ТНТ произведен в СССР на о. Новая Земля 30 октября 1961 г. На пяти ИП в работе (Stoffregen, 1962) приведены временные зависимости $f_0F_2(t)$, а в работе (Kohl, 1964) — скорости (V) перемещения серии максимумов возмущений f_0F_2 , последовательно появившихся после взрыва на каждом ИП. Эти зависимости $f_0F_2(t)$ и V (номер максимума) приведены на рис. 4, взятого из работы Роу [55]. Как оказалось, на каждом ИП значения квазипериодов T в $f_0F_2(t)$ аппроксимируются линейной возрастающей зависимостью от времени, среднее значение T для каждого ИП линейно возрастает с ростом R . В этом эксперименте впервые было выявлено, что с возрастанием временной задержки от момента взрыва (при фиксированных значениях R) каждый новый полупериод временных колебаний превышает смежный с ним предшествующий полупериод. Таким образом, ПИВ представляет собой не гармоническое, а квазигармоническое колебание N_mF_2 во времени.

На зависимостях V (номер максимума) также впервые проявился, на первый взгляд, совершенно парадоксальный эффект, заключающийся в том, что в диапазоне более 4000 км от места взрыва каждый максимум f_0F_2 распространялся со своей, присущей только ему, постоянной скоростью. Значение скорости перемещения максимумов (пронумерованных в процессе их появления) уменьшалось с ростом временной задержки регистрации максимума относительно

Рис. 4. а — вариации $f_0F_2(t)$, зарегистрированные на разных расстояниях от места ядерного взрыва по данным [55]. Наименования измерительных пунктов указаны над графиками; **б** — времена наблюдений максимумов в $f_0F_2(t)$ по данным [55]: точки — наблюдения серии из четырёх последовательных максимумов в разных пунктах, косые крестики — наблюдения первого возмущения на ионограммах, квадратики — наблюдения первого возмущения по данным обратного рассеяния. Прямые — линейные аппроксимации. 11 : 00 MET соответствует 10 : 00 GMT



момента взрыва (зависимость скорости от номера максимума).

Упомянутые эффекты гипотеза Хайнса [36] объяснить не может. Для их описания в работе [55] была разработана теория возмущения недиссипативной атмосферы точечным источником. В этой теории атмосфера полагалась изотермической, с постоянной скоростью звука, с постоянным ускорением свободного падения. Спустя семь лет разработана аналогичная теория [32]: вычислен отклик атмосферы на точечный источник (локальное воздействие). В этой теории также полагались постоянными скорость звука (они были различными в нижней атмосфере и в термосфере) и ускорение свободного падения. Наглядные результаты расчётов квазигармонических возмущений для высоты $z = 200$ км, заимствованные из этой работы, приводятся на рис. 5 и 6.

На рис. 5 иллюстрируется расширение пространственного цуга АГВ при увеличении временной задержки Δt от момента точечного воздействия. В работе показано, что средние значения горизонтального квазипериода $\langle L \rangle$ в пространственном цуге АГВ линейно возрастают от 115 км при $\Delta t = 1$ ч, до 549 км при $\Delta t = 5$ ч.

Расширение временного цуга и рост среднего значения квазипериода $\langle T \rangle$ во временном цуге

при возрастании R от 1000 до 5000 км показан на рис. 6. В статье установлено, что рост средних значений $\langle T \rangle$ временного цуга при возрастании R и увеличение T со временем Δt в цуге происходят по линейным законам.

Если рост $\langle T \rangle$ при возрастании R и увеличение T во временном цуге впервые выявлены в [55] по данным, взятым из (Stoffregen, 1962), то рост L в пространственном цуге впервые экспериментально обнаружен в [23] (см. рис. 2). Спустя год после публикации [55], в [23], также в ядерном эксперименте, была получена зависимость $\langle T \rangle (R)$ (см. рис. 7, а). Наша модель аппроксимирует её с погрешностью 3.6 % [31] (см. также текст к рис. 14 в статье). Спустя 14 лет после публикации [23] в [53] приведена зависимость $T(R)$, вычисленная по данным, полученным после взрывов ядерных бомб и извержения вулкана (см. рис. 7, б). Таким образом, теория, предложенная Франсис [32], хорошо описывала эффекты, экспериментально выявленные при исследовании АГВ-ПИВ.

За несколько лет до появления теории Франсис опубликованы работы Лиу и Еха [45, 66] с предложенной ими моделью возмущения атмосферы точечным источником. Эта теоретическая модель была подобной теориям Роу [55] и

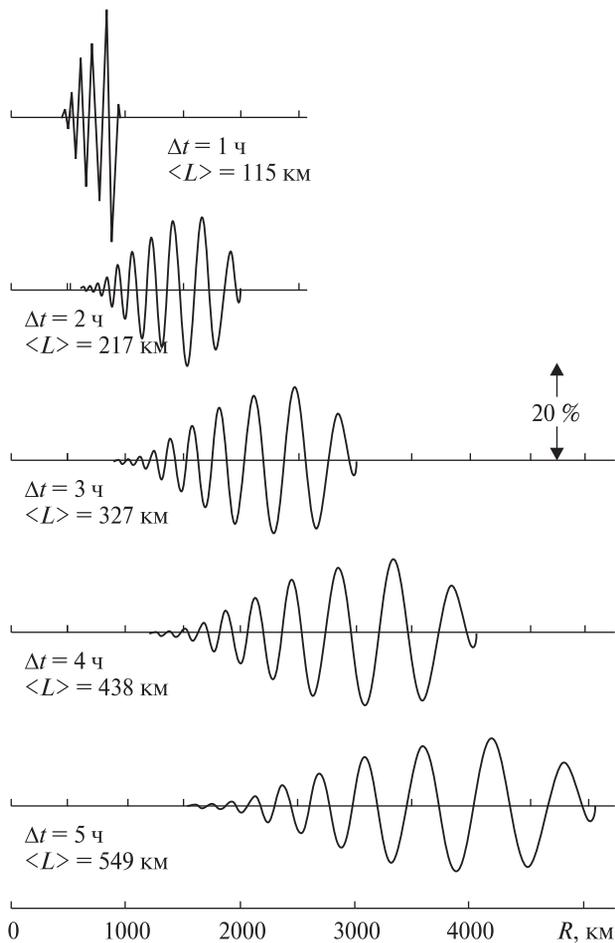


Рис. 5. Пространственные пути $\Delta N/N(R)$, рассчитанные для высоты $z = 200$ км и разных времён запаздывания Δt от момента точечного воздействия. В угловых скобках указываются средние значения в пути пространственно-го квазипериода L для каждого значения Δt

Франсис [32], она также описывала все упомянутые эффекты, обнаруженные при изучении АГВ-ПИВ. Так же, как и в теориях Роу, Франсис, в теории Лиу и Еха благодаря очень упрощённой модели атмосферы удалось получить аналитическое решение задачи. Робертс [53] выбрал модель Лиу и Ех для анализа возмущений ионосферы, полученных после взрыва вулкана *St. Helens* (для краткости здесь и ниже мы не будем упоминать соавторов упомянутой работы [53]). Роу, Франсис, Лиу и Ех при расчётах параметров АГВ-ПИВ по своим моделям задавались характеристиками среды распространения воз-

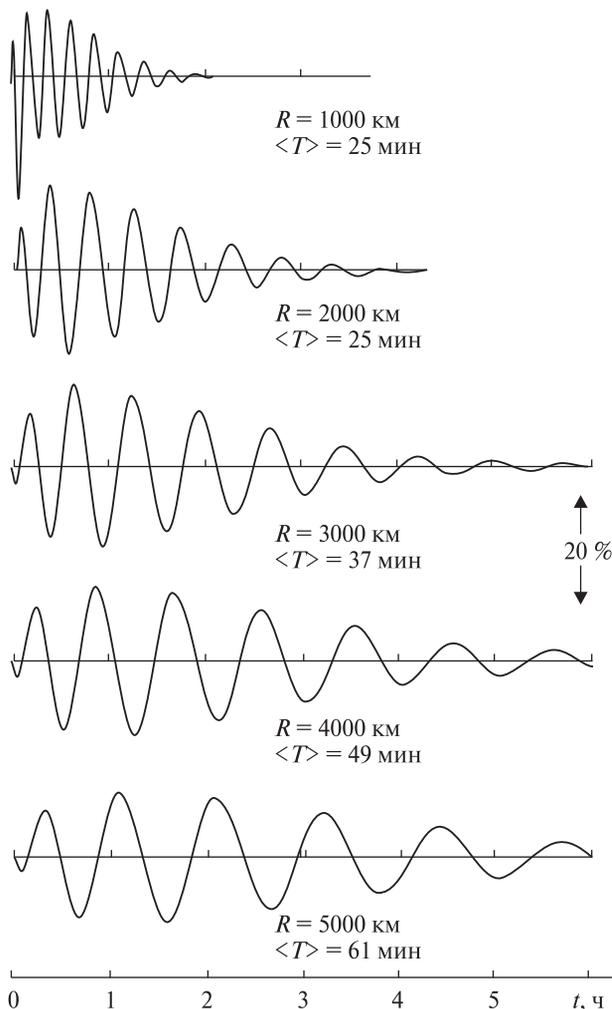


Рис. 6. Временные пути $\Delta N/N(t)$, рассчитанные для высоты $z = 200$ км и разных расстояний R от местоположения точечного воздействия. В угловых скобках указываются средние значения T в пути временного квазипериода для каждого значения R . Временная ось отсчитывается от появления начального возмущения

мущений на основе существующих в те годы представлений о параметрах атмосферы. Поэтому результаты их расчётов качественно описывали наблюдаемые эффекты, однако количественно отличались друг от друга. Робертс же средние параметры атмосферы на время проведения измерений вычислил в ходе адаптации модели Лиу и Еха по высокоточным экспериментальным данным, полученным после взрыва вулкана *St. Helens*.

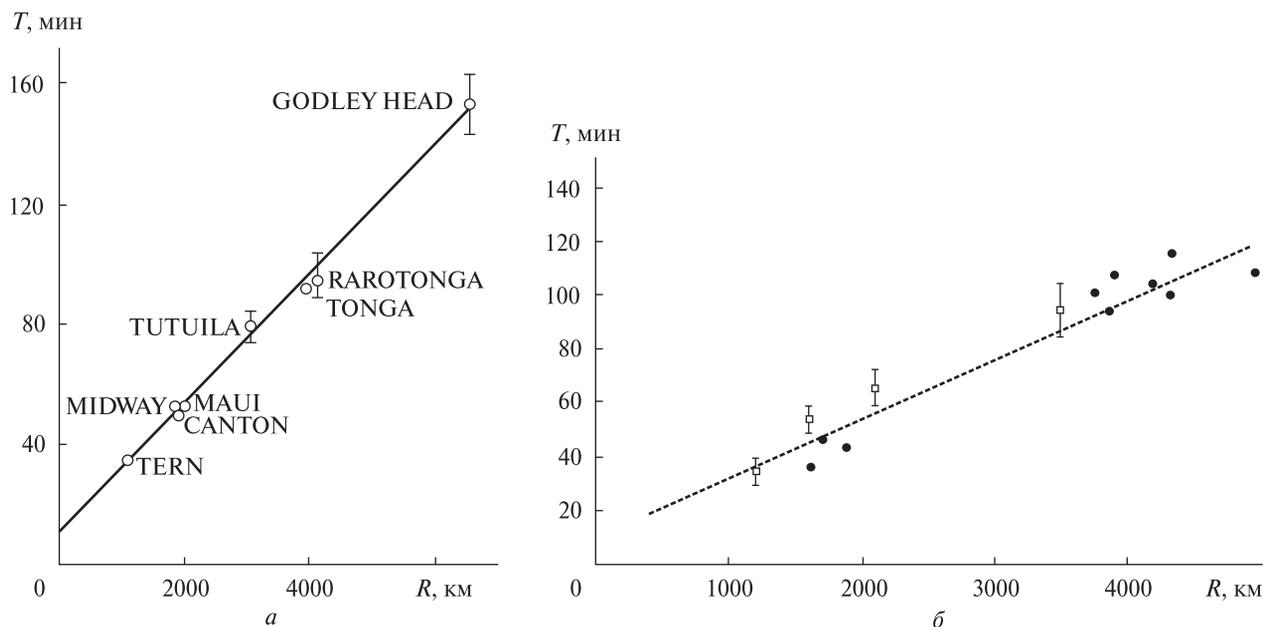


Рис. 7. *a* — линейная аппроксимация экспериментальной зависимости длительности первого квазипериода T временных флуктуаций $f_0 F_2(t)$ от дальности R до места низковысотного ядерного взрыва [23]. На рисунке указаны названия пунктов, в которых располагались ионозонды; *b* — зависимости величины первого (наибольшего) квазипериода T от расстояния R до местоположения локального воздействия: точки — вулкан *St. Helens* [53], квадратики — ядерный взрыв на Новой Земле [55], штрихи — ядерный взрыв в Housatonic [23]

Для анализа экспериментальных данных по скорректированной модели Лиу и Еха [45, 66] Робертс в работах [53, 54] в координатах $(R, \Delta t)$ рассчитал пространственно-временную динамику экстремумов цуга ПИВ, последовательно возбуждаемых точечным источником. На рис. 8, *a* [53] и 8, *b* [54] приводятся в координатах $(R, \Delta t)$ местоположения этих экстремумов в виде отрезков прямых, пронумерованных в верхней части графиков. Линейные зависимости положений экстремумов свидетельствует о том, что скорости экстремумов ПИВ (с выбранным номером) в диапазоне $R = 0 - 2000$ км и интервале $\Delta t = 0 - -200$ мин не изменяются. Любая точка на этих отрезках характеризуется одной и той же скоростью V (для выбранного отрезка), равной отношению координаты по R к координате по Δt . Значения V , вычисленные нами упомянутым способом указаны в табл. 1 рецензируемой статьи и представляют собой ключевую часть нашей модели.

Ещё раз отмечаем, что значения V мы вычислили по графикам, рассчитанным с использованием теоретической модели возмущения атмосферы то-

чечным источником, полученной с применением уравнений геофизической гидродинамики. При этом модель атмосферы была адаптирована (скорректирована) на время проведения измерений. Именно поэтому модель *Ukraine-2013* является полумпирической, гибридной моделью: она основывается как на теоретических, так и на экспериментальных результатах.

Следствия, полученные по теоретической модели (постоянство скоростей перемещения экстремумов на расстояниях вплоть до 2000 км), подтверждают экспериментальные данные, приведенные на рис. 4: экстремумы перемещаются с постоянными скоростями, значения которых уменьшаются с увеличением номера последовательно появляющихся экстремумов. Понятно, что рассчитывались скорости только для экстремумов, поскольку максимумы и минимумы удобно выявлять на экспериментальных зависимостях. Однако и любой другой фрагмент цуга АГВ-ПИВ также перемещается со своей скоростью, определяемой его временной задержкой относительно начала возмущения. Например, в

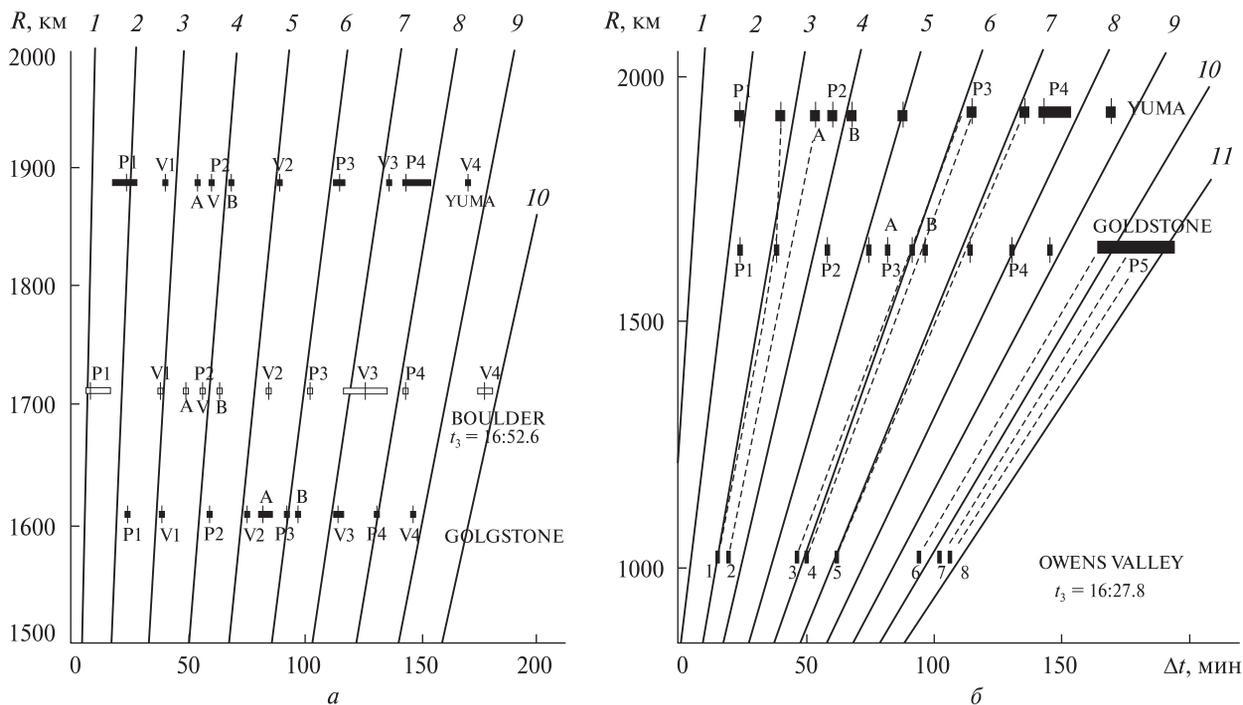


Рис. 8. Расчётные значения пространственно-временной динамики экстремумов цуга ПИВ, последовательно возбуждаемых точечным источником в координатах $(R, \Delta t)$. Здесь R — расстояние до источника, Δt — временная задержка, отсчитываемая от момента возмущения. Местоположения экстремумов (в виде отрезков прямых) пронумерованы в верхней части графиков. Значение скорости V каждого пронумерованного экстремума указаны в табл. 1 рецензированной статьи; a, b — расчёт выполнен соответственно в работах [53] и [54]

статье табл. 5 иллюстрирует рассчитанные нами скорости нулевых возмущений цуга.

Для верификации (а не калибровки (адаптации), как ошибочно утверждает оппонент) нашей модели мы использовали литературные данные об ионосферных возмущениях, порожденных ядерными взрывами, извержениями вулканов и землетрясениями. Эти эксперименты выполнены при разном времени суток, при различных сезонах года, в высоких, средних и низких широтах, при разных уровнях магнитной и солнечной активностей. В результате оказалось, что модельные скорости экстремумов при различных гелиогеофизических условиях позволяют прогнозировать параметры ПИВ с погрешностью до 12 %.

Эффект постоянства (при различных гелиогеофизических условиях, для различных R) вычисленных нами скоростей перемещения экстремумов цуга позволил продвинуться в разработке

глобальной модели электронной концентрации ионосферы реального времени. Мы впервые выявили определяющие параметры модели АГВ-ПИВ, позволяющие по простым формулам вычислять пространственно-временную зависимость N в невозмущённых и возмущённых условиях. Однако, невзирая на хорошие результаты прогноза параметров возмущений, мы планируем (для повышения точности прогноза) уточнять значения V (номер экстремума) привлекая численные решения уравнений геофизической гидродинамики (без их линеаризации) при характерных геофизических условиях высоких, средних и низких широт (см. в статье п. *Пути совершенствования модели.*).

Пространственно-временное постоянство скоростей перемещения экстремумов и их убывание с увеличением номера экстремума в цуге делает очевидным экспериментально обнаруженный линейный рост временных (при увеличении Δt) и

пространственных (при возрастании R) квазипериодов цуга, линейность средних значений пространственных и временных квазипериодов при росте соответственно Δt и R . Поэтому при моделировании пространственно-временных возмущений N мы предложили использовать новые параметры АГВ: постоянные скорости перемещения экстремумов (и всех других фрагментов) цуга. Это позволило разработать модель АГВ-ПИВ, пригодную для оперативного расчета пространственно-временного распределения N реального времени.

Заслуживает дополнительного рассмотрения вопрос о сверхзвуковых скоростях АГВ-ПИВ. Многие геофизики зачастую молчаливо придерживаются мнения о недопустимости таких скоростей. При этом происхождение отдельных гребней цуга бездоказательно приписывают разным физическим эффектам. Так, в (Rolland et al., 2011) выделяется три типа волн, высказывается гипотеза (она упоминается и во многих других работах), согласно которой первый гребень цуга ПИВ (указанный в их статье), перемещения со скоростью < 3 км/с, порождён поверхностной волной Рэлея, второй, менее скоростной гребень < 1 км/с, является проявлением акустической волны, непосредственно возбуждённой землетрясением, третий — со скоростью ~ 0.225 км/с обусловлен всенаправленными АГВ-ПИВ. Заметим, что скорость АГВ < 1 км/с на высоте около 300 км — это также сверхзвуковая скорость. Какие-либо серьёзные теоретические доказательства существования столь сложного механизма формирования различных гребней единого цуга не приводятся. При этом, например, в (Pradipta et al., 2014) скорость ПИВ $\sim 3.4 - 2$ км/с наблюдалась после магнитной бури, поэтому причастность волн Рэлея к их порождению исключается.

Вместе с тем в работе (Ясюкевич и др., 2016) при анализе скоростей экстремумов ПИВ, зарегистрированных после землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. (впервые описанного в (Rolland et al., 2011)), также выделяется три типа волн: быстрые возмущения, соответствующие волнам Рэлея, акустико-гравитационные и медленные гравитационные волны. Причастность обнаруженных экстремумов к упомянутым видам волн

в качестве предположения основывается только по значениям их скоростей перемещения. При этом в выводах к работе эта гипотеза не упоминается, отмечается только, что обнаружены три моды: быстрая, средняя и медленная.

После локального (точечного) энерговыделения наблюдается возмущение не только атмосферы (и ионосферы), но и геомагнитного поля. При этом возбуждаются серии геомагнитных пульсаций, каждая из которых также (как и АГВ-ПИВ при землетрясениях и других локальных выделениях энергии и импульса) приходит к ИП с постоянными скоростями. Скорость серии уменьшается от номера её появления над ИП. Поскольку энерговыделение происходит в атмосфере (при отсутствии землетрясения), то авторы, открывшие упомянутые серии пульсаций, для их объяснения волны Рэлея не привлекают, они предлагают другие причины. Так, например, в статье (Черногор, 2011) высказывается ряд возможных причин, ответственных за существование последовательно порождаемых серий колебаний напряжённости геомагнитного поля, наблюдаемых после пролёта болида: «Возмущения, вызванные пролетом болида, скорее всего, переносились при помощи медленных МГД волн ($v \approx 7-8$ км/с), УАГВ ($v \approx 800-850$ м/с), ВГВ ($v \approx 400-450$ м/с, $v \approx 260-280$ м/с) и инфразвук ($v \approx 300-340$ м/с)». Причастность указанных волн к природе этого нового эффекта обуславливается исключительно по значениям скоростей, какой-либо физический механизм порождения волн не предлагается. Вместе с тем появление всех упомянутых серий колебаний объяснимо с привлечением нашей модели АГВ-ПИВ (Федоренко, 2017, подана в печать).

Таким образом, мы считаем, что оппонент гипотезу, высказанную в работе (Rolland et al., 2011), относительно причастности волн Рэлея к объяснению эффектов, наблюдаемых после землетрясения, ошибочно принял за теорию. В этом заключается источник его неприятия сверхзвуковых скоростей АГВ-ПИВ.

Как показал предшествующий анализ, теория и практика свидетельствуют о том, что на высоте ~ 300 км АГВ-ПИВ могут распространяться со скоростями от 0.17 до 11 км/с.

Сформулируем основные заключения предшествующего рассмотрения параметров АГВ-ПИВ.

1. Каждый экстремум цуга АГВ-ПИВ распространяется со своей, присущей только ему, постоянной скоростью вдоль всего пути распространения волны.

2. Сверхзвуковые скорости распространения экстремумов ПИВ экспериментально наблюдаются и теоретически объяснимы.

3. АГВ-ПИВ-волна является квазигармонической. Наиболее сильно значения смежных полупериодов отличаются друг от друга в лидирующей части цуга. Почти гармонической волна становится, начиная с седьмого экстремума, после которого различие в скоростях распространения смежных экстремумов резко уменьшается (см. табл. 1 в статье). Поэтому гипотеза Хайнса не отвергается полностью, однако от её исключительного применения для анализа данных АГВ-ПИВ следует воздерживаться.

ВЫВОДЫ

Таким образом, из рассмотрения комментария становится ясно, что её автор искажил основные результаты работы и сделал ряд ошибочных выводов. Поэтому в данной статье приведены дополнительные разъяснения, свидетельствующие о том, что на высоте ~300 км экспериментально обнаруженные скорости экстремумов АГВ-ПИВ (в том числе и сверхзвуковые) объясняются теориями отклика атмосферы на локальное воздействие, опубликованными в 1967—1974 годах. Необоснованное мнение оппонента о том, что амплитуды АГВ-ПИВ «обычно много меньше 10—20 %» мы опровергаем результатами анализа ряда исследований, выполненных в 1968—2016 гг., свидетельствующих о том, что упомянутые амплитуды часто составляют 40—100 %.

Алебастров В. А., Мальцев А. Т., Троицкий Б. В. Возмущения в ионосфере, вызываемые наземным взрывом // Физика Земли. — 1985. — № 11. С. 55—60.

Афраймович Э. Л., Башкуев Ю. Б., Бернгардт О. И. и др. Детектирование параметров перемещающихся ионосферных возмущений по данным одновременных измерений электронной концентрации, полного электронного содержания и доплеровского смещения

частоты на радиофизическом комплексе ИСЗФ // Геомагнетизм и аэрономия. — 2004. — 44, № 4. — С. 463—475.

Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Татаринцов П. В. Экспериментальное доказательство существования уединённой внутренней гравитационной волны в атмосфере Земли во время мощной магнитной бури 30 октября 2003 г. // Тр. VII Сессии молодых учёных. Секция «Дистанционное зондирование...», БШФФ. — 2004. — С. 51—53.

Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Ратовский К. Г. и др. GPS-детектирование уединённых внутренних волн, генерируемых во время мощных магнитных бурь // Распространение радиоволн: Докл. 21 Всероссийской науч. конф. — Йошкар-Ола, 2005. — Т. 1. — С. 124—128.

Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. — М.: Наука, 1974. — 256 с.

Перевалова Н. П. Исследование ионосферных возмущений методом трансionoсферного GPS-зондирования: Дис. ... доктора физ.-мат. наук. — Иркутск, 2014. — 286 с.

Перевалова Н. П., Воейков С. В., Ясюкевич Ю. В. и др. Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — 9, № 3. — С. 172—180.

Перевалова Н. П., Шестаков Н. В., Воейков С. В. и др. Исследование распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Tohoku, в дальней от очага зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2016. — 13, № 1. — С. 186—196.

Словарь русского языка. — М.: Русский язык, 1985. — Т. 1. — 699 с.

Федоренко Ю. П. Возбуждение наземных геомагнитных пульсаций РС5 акустико-гравитационными волнами // Космічна наука і технологія. — 2017. — 23. — № 2.

Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2011. — 51, № 1. — С. 119—132.

Ясюкевич Ю. В., Едемский И. К., Перевалова Н. П. и др. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS: монография. — Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. — 259 с.

Ясюкевич Ю. В., Захаров В. И., Куницын В. Е. и др. Отклик ионосферы на землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. по данным различных GPS-методик // Геомагнетизм и аэрономия. — 2015. — 55, № 1. — С. 113—122.

Ясюкевич Ю. В., Перевалова Н. П., Воейков С. В. и др. Землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. как источник ионосферных возмущений // Современная геодина-

- мика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе (Материалы Всерос. совещания и мол. школы по совр. геодинимике. г. Иркутск, 23–29 сентября 2012). — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. — Т. 2. — С. 204–208.
- Bristow W. A., Greenwald R. A. Estimating gravity wave parameters from oblique high-frequency backscatter: Modeling and analysis // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100**(A3). — P. 3639–3648.
- Chen C. H., Saito A., Lin C. H., et al. Long-distance propagation of ionospheric disturbance generated by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth Planets Space.* — 2011. — **63**. — P. 881–884.
- Choi B. K., Lee S. J., Yoon H. S. Ionospheric TEC Disturbances over South Korea Following the 2011 Great Tohoku Earthquake. Research Inventory // *Int. J. Eng. Sci.* — 2016. — **6**, N 6. — P. 35–42. — Mode of access: www.researchinventory.com.
- Daniels F. B., Bauer S. J., Harris A. K. Vertically traveling shock waves in the ionosphere // *J. Geophys. Res.* — 1960. — **65**. — P. 1848–1859.
- Galvan D. A., Komjathy A., Hickey M. P., et al. Ionospheric signatures of Tohoku-Oki tsunami of March 11, 2011: model comparisons near the epicenter // *Radio Sci.* — 2012. — **47**, N 4. — RS4003. — Mode of access: doi:10.1029/2012RS005023.
- Heki K., Otsuka Y., Choosakul N., et al. Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* — 2006. — **111**. — B09313. — Mode of access: doi:10.1029/2005JB004202.
- Jin S., Occhipinti G., Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics // *Earth-Sci. Revs.* — 2015. — **147**. — P. 54–64.
- Jin S., Jin R., Li J. H. Pattern and evolution of seismo-ionospheric disturbances following the 2011 Tohoku earthquakes from GPS observations // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* — 2014. — Mode of access: doi:10.1002/2014JA019825.
- Kohl W. Acoustic gravity waves caused by the nuclear explosion on October 30th 1961 // *Proc. NATO Advanced Study Inst., Skeikampen, Norway.* — 1963. — P. 160–169, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1964.
- Nishitani N., Ogawa T., Otsuka Y., et al. Propagation of large amplitude ionospheric disturbances with velocity dispersion observed by the SuperDARN Hokkaido radar after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth Planets Space.* — 2011. — **63**. — P. 891–896.
- Occhipinti G., Rolland L., Lognonné P., et al. From Sumatra 2004 to Tohoku-Oki 2011: The systematic GPS detection of the ionospheric signature induced by tsunamigenic earthquakes // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* — 2013. — **118**. — P. 1–11. — Mode of access: doi:10.1002/jgra.50322.
- Pradipta R., Valladares C. E., Doherty P. H. GPS observation of continent-size traveling TEC pulsations at the start of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* — 2014. — **119**, N 8. — P. 875–879. (AGU PUBLICATION 2014. — P. 6913–6924). — Mode of access: doi:10.1002/2014JA020177.
- Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., et al. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth Planets Space.* — 2011. — **63**. — P. 853–857. — Mode of access: doi:10.5047/eps.2011.06.020
- Stoffregen W. Ionospheric effects observed in connection with nuclear explosions at Novaya Zemlya on October 23 and 30, 1961. — Res. Inst. Natl. Defense, Stockholm, Sweden, FOAS, 1962. — Rapport A517.
- Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y., et al. Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth Planets Space.* — 2011. — **63**, N 7. — P. 875–879. — Mode of access: doi:10.5047/eps.

REFERENCES

- Afraimovich E. L., Bashkuev Yu. B., Bernhardt O. I., et al. Detection of the parameters of travelling ionospheric disturbances obtained by using data of simultaneous measurements of the electron concentration, total electron content, and Doppler frequency shift obtained at the radiofysical complex of the ISTF. *Geomagnetizm i aeronomiya*, **44** (4), 463–475 (2004).
- Afraimovich E. L., Voeikov S. V., Tatarinov P. V. Experimental proof of a single internal gravitational wave in Earth's atmosphere during powerful magnetic storm on October 30, 2003. *Proceedings of the VII Session of Young Scientists.* Section "Remote sensing ...", BShFF-2004, 51–53 (2004).
- Afraimovich E. L., Voeikov S. V., Ratovsky K. G., et al. GPS-detection of solitude internal waves generated during powerful magnetic storms. In collection of reports of 21 All-Russian Scientific Conference. "Propagation of radio waves", May 25–27, 2005, Yohshkar-Ola, 1, 124–128 (2005).
- Alabasterov V. A., Maltsev A. T., Troitsky B. V. Perturbations in the ionosphere caused by a ground explosion. *Phys. Earth*, N 11, 55–60 (1985).
- Dictionary of the Russian language, vol. 1, 699 p. (Russkiy yazyk, Moscow, 1985) [in Russian].
- Gershman B. N. The dynamics of the ionospheric plasma, 256 p. (Nauka, Moscow, 1974) [in Russian].
- Chernogor L. F. Fluctuations of the geomagnetic field caused by the passage of the Vitim bolide on September 24, 2002. *Geomagnetizm i aeronomiya*, **51** (1), 119–132 (2011).

- Fedorenko Yu. P. Excitation of PC5 terrestrial geomagnetic pulsations by acoustic gravity waves. *Kosm. nauka tehnol.*, **23** (2017). Submitted.
- Yasyukevich Yu. V., Zakharov V. I., Kunitsyn V. E., et al. The response of the ionosphere to the earthquake in Japan on March 11, 2011, according to various GPS methods. *Geomagnetizm i aeronomiya*, **55** (1), 113–122 (2015).
- Yasyukevich Yu. V., Perevalova N. P., Voeikov S. V., et al. Earthquake in Japan March 11, 2011 as a source of ionospheric disturbances. Modern geodynamics of Central Asia and dangerous natural processes: results of studies on a quantitative basis. Siberian Branch of RAS. Institute of the Earth's Crust. Materials of the All-Russian Conference and Youth School (September 23–29, 2012) Irkutsk, 2, 204–208 (2012).
- Perevalova N. P. Investigation of ionospheric disturbances by a method of transionospheric GPS sounding. Thesis for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Specialty 25.00.29 — Physics of the atmosphere and hydrosphere. Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Irkutsk, 286 p. (2014).
- Perevalova N. P., Voeikov S. V., Yasyukevich Yu. V., et al. The study of ionospheric disturbances caused by the earthquake in Japan on March 11, 2011 by using data of the GEONET network. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, **9** (3), 172–180 (2012).
- Perevalova N. P., Shestakov N. V., Voeikov S. V., et al. Study of the propagation of ionospheric disturbances caused by the Tohoku earthquake in far zone of its center. *Modern problems of remote Earth sensing from Space*, **13** (1), 186–196 (2016).
- Bristow W. A. and Greenwald R. A. Estimating gravity wave parameters from oblique high frequency backscatter: Modeling and analysis. *J. Geophys. Res.*, **100**(A3), 3639–3648 (1995).
- Chen C. H., Saito A., Lin C. H., et al. Long-distance propagation of ionospheric disturbance generated by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 881–884 (2011).
- Choi B. K., Lee S. J., Yoon H. S. Ionospheric TEC Disturbances over South Korea Following the 2011 Great Tohoku Earthquake. *Research Inventy. Int. J. Eng. Sci.*, **6** (6), P 35–42 Issn (e): 2278–4721, Issn (p):2319-6483 (2016), www.researchinventy.com.
- Daniels F. B., Bauer S. J., Harris A. K. Vertically traveling shock waves in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **65**, 1848–1859 (1960).
- Galvan D. A., Komjathy A., Hickey M. P., et al. Ionospheric signatures of Tohoku-Oki tsunami of March 11, 2011: model comparisons near the epicenter. *Radio Sci.*, **47** (4), (2012) RS4003 doi:10.1029/2012RS005023.
- Heki K., Otsuka Y., Choosakul N., et al. Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.*, **111**, (2006) B09313. doi:10.1029/2005JB004202.
- Jin S., Jin R., Li J. H. Pattern and evolution of seismo-ionospheric disturbances following the 2011 Tohoku earthquakes from GPS observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, (2014). 10.1002/2014JA019825.
- Jin S., Occhipinti G., Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth-Sci. Revs*, **147**, 54–64 (2015).
- Kohl W. Acoustic gravity waves caused by the nuclear explosion on October 30th 1961. Proc. NATO Advanced Study Inst., Skeikampen, Norway. — 1963. — P. 160–169, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1964.
- Nishitani N., Ogawa T., Otsuka Y., et al. Propagation of large amplitude ionospheric disturbances with velocity dispersion observed by the SuperDARN Hokkaido radar after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 891–896 (2011).
- Occhipinti G., Rolland L., Lognonné P., et al. From Sumatra 2004 to Tohoku-Oki 2011: The systematic GPS detection of the ionospheric signature induced by tsunamigenic earthquakes. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **118**, 1–11 (2013), doi:10.1002/jgra.50322.
- Pradipta R., Valladares C. E., Doherty P. H. GPS observation of continent-size traveling TEC pulsations at the start of geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **119** (8), 875–879 (2014). AGU PUBLICATION 2014. P. 6913–6924 doi: 10.1002/2014JA020177.
- Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., et al. 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).
- Stoffregen W. Ionospheric effects observed in connection with nuclear explosions at Novaya Zemlya on October 23 and 30, 1961, as Res. Inst. Natl. Defense, Stockholm, Sweden, FOAS, Rapport A517, 1962.
- Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y., et al. Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63** (7), 875–879 (2011). doi:10.5047/eps.

Ю. П. Федоренко

Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, Харків

**ВІДПОВІДЬ НА КОМЕНТАР Г.В. ЛІЗУНОВА
ДО СТАТТІ «ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА
ДИНАМІКА ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ,
ЩО ПЕРЕМІЩАЮТЬСЯ»**

Виконано детальний розбір зауважень Г. В. Лізунова, викладених в його коментарі на нашу роботу «Просторово-часова динаміка іоносферних збурень, що переміщуються», опубліковану в журналі «Космічна наука і технологія». — 2016. — **22**, № 5. Показано глибоку помилковість суджень автора коментаря відносно питань обговорюваної статті. Ілюструються ключові кроки експериментальних і теоретичних досліджень, на основі яких нам вдалося запропонувати радикально новий підхід до моделювання процесів зародження і поширення іоносферних збурень, що переміщуються (ІЗП). Теоретично і експериментально доведено, що акустико-гравітаційні хвилі (АГХ) на іоносферних висотах можуть поширюватися зі швидкостями, що у декілька разів перевищують швидкість звуку. Відносні амплітуди АГХ-ПІВ часто дорівнюють 40—100 %.

Ключові слова: модель, АГХ-ПІВ, надзвукові швидкості, відносні амплітуди збурень, просторові і часові квазіперіоди.

Yu. P. Fedorenko

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv

**RESPONSE OF THE AUTHORS
TO THE COMMENTARY BY G. V. LIZUNOV
ON OUR PAPER “SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS
OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES”**

A detailed analysis of G. V. Lizunov's remarks concerning our article "Spatio-temporal dynamics of travelling ionospheric disturbances" published in "Space Science and Technology". — 2016. — **22**, No. 5 is presented. We show that the remarks are deeply mistaken. The key stages of experimental and theoretical studies, which allow us to propose the radically new approach to the simulation of the origination and propagation of travelling ionospheric disturbances (TID), are presented. We have proved theoretically and experimentally that acoustic-gravity waves (AGW) can propagate at ionospheric heights with velocities several times higher than the sound velocity. Relative TID amplitudes can often be in the range from 40 to 100 %.

Keywords: model, AGW-TID, supersonic velocity, extremum, relative perturbation amplitude, spatial and temporal quasiperiod.

Редколлегия журнала благодарит Г. В. Лизунова, автора комментария на статью О. Ф. Тырнова, Ю. П. Федоренко, В. Л. Дорохова «Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений» и Ю. П. Федоренко, подготовившего ответ на комментарий, за интересную дискуссию, которая будет полезна читателям журнала.