

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/293607683>

Acoustic disturbance from an underground nuclear explosion as a source of electrostatic turbulence in the magnetosphere

Article · July 1990

CITATIONS

2

READS

37

4 authors, including:



Viacheslav A. Pilipenko

Russian Academy of Sciences

297 PUBLICATIONS 2,742 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



O. A. Pokhotelov

Russian Academy of Sciences

239 PUBLICATIONS 3,249 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Project

Development of the Russian segment of the INTERMAGNET network. [View project](#)



Project

ULF waves at low-Earth Orbit (ESA Swarm observations) [View project](#)

© М.Б. ГОХБЕРГ, В.А. ПИЛИПЕНКО,
О.А. ПОХОТЕЛОВ, С. ПАРТАСАРАТИ

**АКУСТИЧЕСКОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ
ОТ ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА
КАК ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
В МАГНИТОСФЕРЕ**

(Представлено академиком Е.П. Велиховым 23 VI 1989)

1. Многочисленные эксперименты по изучению динамического взаимодействия между атмосферой и ионосферой показали, что ионосфера может служить чувствительным индикатором естественных и антропогенных источников возмущений. Наиболее отчетливо эти возмущения проявляются в инфразвуковом диапазоне, так как в этой полосе частот естественный фон атмосферной турбулентности ниже, чем в диапазоне внутренних гравитационных волн. При доплеровском радиозондировании ионосферы выявлены импульсные и волновые возмущения, возбуждаемые такими мощными источниками инфразвука, как землетрясения и цунами, мегатонные ядерные взрывы в атмосфере, килотонные наземные промышленные взрывы, работа мощных ракетных двигателей, грозы и торнадо. Данные наблюдений, систематизированные в обзорах [1–3], хорошо укладывались в простую физическую картину: акустическая волна, распространяющаяся вверх в атмосфере с экспоненциально спадающей плотностью, увеличивает свою амплитуду и на ионосферных высотах модулирует параметры ионосферной плазмы. Поэтому ионосферное зондирование позволяет обнаруживать следы инфразвуковых возмущений, которые в приземном слое практически неразличимы на фоне атмосферных шумов.

О высокой чувствительности ионосферы свидетельствуют экспериментально зарегистрированные эффекты даже от сравнительно слабых возмущений. Удавалось обнаруживать ионосферные возмущения от пролетов сверхзвуковых реактивных самолетов, от удаленных запусков ракет [4]. Об обнаружении ионосферного эффекта от подземного ядерного взрыва было впервые сообщено в [5].

Во всех вышеописанных экспериментах ионосферная плазма играла по существу роль пассивного экрана для радиоволн от наземного передатчика. Таким образом, упомянутые эффекты затрагивают физику лишь чисто атмосферных возмущений. Однако к настоящему времени накопилось довольно много экспериментальных указаний на существенную роль взаимодействия нейтральной и ионизированной компонент в динамике волновых возмущений верхней атмосферы. Теоретические оценки [6, 7] указали на принципиальную возможность высокой эффективности трансформации акустической волны в МГД-возмущения. На качественном уровне можно представлять себе, что достигающие E -слоя акустические возмущения приводят к генерации струй продольного тока (иначе – альвеновских волн), уходящих в магнитосферу вдоль геомагнитного поля. Магнитный эффект локальной токовой системы, индуцированной акустическим воздействием, может быть значительным в магнитосфере и с трудом различим на поверхности Земли [8].

Наиболее убедительным аргументом в пользу идеи об эффективности трансформации акустических возмущений в МГД волны стали результаты серии экспери-

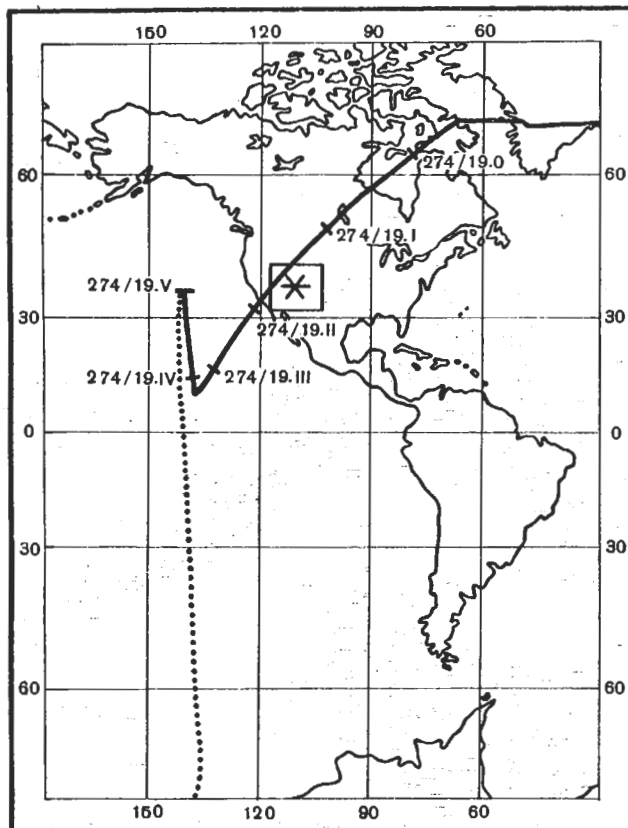


Рис. 1. Проекция орбиты спутника DE-2 (1981 г., день 274, 19,0–19,5^h UT). Сплошная линия – подспутниковая точка, пунктирная – проекция вдоль силовой линии. Звездочкой отмечен эпицентр взрыва

ментов "МАССА". Эти широкомасштабные эксперименты проводились с целью изучения эффектов воздействия промышленного взрыва на ионосферу [9]. Наиболее яркие и неожиданные эффекты были зарегистрированы на спутнике "Ореол-3" [10]. При подлете спутника к области взрыва на высоте 800 км были зарегистрированы импульсы магнитного и электрического полей с амплитудами соответственно 10 нТл и 10 мВ/м. Магнитный импульс нес с собой локальный всплеск квазиэлектростатических колебаний в диапазоне частот десятки–сотни герц. В последующих экспериментах серии "МАССА" аналогичный магнитный импульс был зарегистрирован и над сопряженной ионосферой.

При пересечении силовой трубки взрыва спутник вошел в широкое "шумящее пятно" низкочастотной (0,1–1 кГц) электростатической турбулентности. В последующих экспериментах подобные электростатические шумы наблюдались в течение времени до 35 мин после взрыва. Была также обнаружена повышенная интенсивность высокочастотных (4,5–16 кГц) электромагнитных шумов в силовой трубке взрыва.

Таким образом, эксперименты "МАССА" показали возможность реализации в ионосферной плазме нескольких каскадов трансформации акустических колебаний в различные типы электромагнитных волн с последующим перераспределением энергии вверх по спектру. Построение физических моделей таких процессов сдержи-

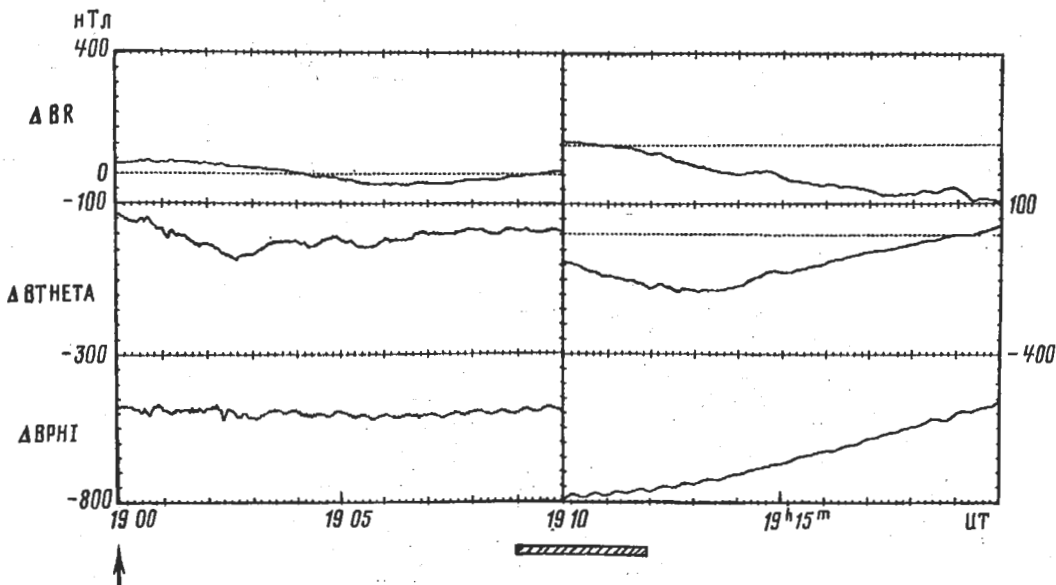


Рис. 2. Данные измерений магнитного поля на DE-2. Приведена разница между измеренными и рассчитанными по модели значениями компонент: BR — радиальная, ВТНЕТА — вертикальная, ВРНІ — азимутальная. Момент прохождения через силовую трубку взрыва отмечен прямоугольником

ваются не столько сложностью теоретической задачи, сколько тем, что все зарегистрированные эффекты были практически единичными событиями. В данной работе предпринята попытка, используя архив спутниковых данных Годдардовского Центра по ракетам и спутникам, найти дополнительные экспериментальные свидетельства усиления ионосферной электромагнитной турбулентности в результате интенсивного акустического воздействия.

2. В качестве источников акустического воздействия на ионосферу нами рассмотрены взрывы, регулярно проводящиеся на полигоне Невада. Исходя из предполагаемой физической картины возможных эффектов, мы отбирали данные низколетящих спутников с комплексом электромагнитных измерений на борту в период пролета через силовую трубку, сопряженную с местом взрыва, не позднее 1 ч после взрыва. Ниже мы остановимся на предварительных результатах, полученных на спутнике DE-2 (Dynamic Explorer-B). Программа экспериментов на DE-2 была нацелена на плазменные и электромагнитные измерения в авроральных областях ионосферы и магнитосферы.

Проведены также траекторные расчеты за весь период функционирования спутника и выделены интервалы, когда спутник проходил в квадрате $\pm 5^\circ$ от магнитной силовой линии, сопряженной с полигоном в Неваде. Для нескольких найденных "удачных" пролетов DE-2 аппаратный комплекс функционировал только в одном случае: 1 X 1981 (день - 274). Взрыв был произведен 01 X 1981 в $19^{\text{h}}00^{\text{m}}\text{UT}$ в точке с координатами $37,13^\circ\text{N}$, $117,23^\circ\text{W}$; эффективная магнитуда 5,6. Орбита спутника для этого события показана на рис. 1. Спутник, двигаясь с высоких широт к экватору в южном полушарии, в период $19^{\text{h}}09^{\text{m}} - 19^{\text{h}}12^{\text{m}}\text{UT}$ пересек на высоте ~ 400 км в утренние часы ($LT = 10,2^{\text{h}}$) силовую трубку, сопряженную с местом взрыва. Анализ основных геомагнитных индексов AE, Dst и Kp показывает, что день взрыва был очень спокойным в геофизическом отношении и, следовательно, благоприятным для обнаружения эффектов немагнитосферного происхождения.

Спутниковые измерения магнитного поля проводили трехкомпонентным индукционным магнитометром с разрешением 1,5 нТл [11]. На рис. 2 приведены отклонения компонент измеренного магнитного поля от величин, рассчитанных по геомагнитной модели. Разрыв в кривых в $9^h 10^m$ связан с автоматическим изменением масштаба и уровня нуля в программе вывода данных. 30-секундные осцилляции (особенно заметные по компоненте ВРН1), а также более мелкие 5-секундные являются аппаратным эффектом. Какие-либо характерные возмущения геомагнитного поля с амплитудой, превышающей аппаратные помехи (~ 10 нТл), при прохождении через силовую трубку взрыва отсутствовали.

Аппаратурный комплекс для векторных измерений UEFI позволял проводить на DE-2 синхронную регистрацию постоянного и переменного электрических полей в разных частотных диапазонах: *A*, *B* (4–1024 Гц) и *C* (1–512 кГц) [12]. В предположении, что флуктуации поля имеют пространственный, а не временной характер, аппаратура DE-2 позволяет изучать электростатическую турбулентность с масштабами от 10 м до 10 км. Данные измерений квазистационарного электрического поля (рис. 3) подтверждают, что анализируемый период был исключительно спокоен в геофизическом отношении, на средних широтах отсутствовали какие-либо возмущения фонового электрического поля в ионосфере. Также не отмечается и возмущений в электрическом поле, которые могли бы быть связаны со взрывом. Не было отмечено каких-либо аномалий при пролете вблизи силовой трубки взрыва в данных измерений крупномасштабного ионосферного потенциала и в показаниях спектрометра CULF диапазона (графики не приводятся).

Рассмотрим более подробно данные спектрометра *A*, который дает информацию об электрической компоненте флуктуаций в ELF диапазоне для регистрируемых амплитуд от 5 мкВ/м до 10 мВ/м. Ось *X* спектрометра ориентирована вдоль вектора скорости спутника, оси *Y*, *Z* отклонены на 45° от нее. Рис. 4 показывает, что по трем высокочастотным каналам наблюдались шумы, интенсивность которых спадала по мере удаления спутника от авроральной области. При прохождении спутника через силовую трубку взрыва наблюдался локализованный всплеск интенсивности электростатических шумов в каналах с частотами от 16–32 до 256–512 Гц. Максимальная интенсивность приходилась, по-видимому, на частоты $(1-2) \cdot 10^2$ Гц.

3. Дальнейшие рассуждения будут основываться на предположении о следующем сценарии последовательных процессов. Интенсивный акустический импульс достигает токонесящего *E*-слоя ионосферы через 5–6 мин после взрыва. Индуцируемые этим импульсом локализованные ионосферные токи замыкаются продольными токами через сопряженную ионосферу. В магнитосфере возмущение распространяется вдоль силовых линий с альвеновской скоростью. На тех высотах, где суммарный ток превысит пороговое значение, необходимое для возбуждения высокочастотной неустойчивости, прошедшей магнитный импульс оставит за собой "пятно" электростатических шумов, расплывающееся под действием диффузии. В описанном событии от предполагаемого момента генерации электростатических шумов альвеновским импульсом до регистрации прошло 3–4 мин. Анализ данных магнитометра DE-2 не обнаружил магнитного импульса, аналогичного зарегистрированному на "Ореол-3" в эксперименте "МАССА". Нам это представляется довольно естественным, если учесть быстрый уход магнитного импульса с альвеновской скоростью из области генерации.

Частоты зарегистрированных электростатических шумов определяются их пространственной структурой. Зарегистрированные на DE-2 частоты 30–500 Гц соответствуют поперечным масштабам неоднородностей 100–7 м. Максимальная интенсивность шумов приходится на масштабы турбулентности, соответствующие параметру $kr_i \approx 1$ (r_i – ларморовский радиус O^+ -ионов).

Принципиальное значение для рассматриваемой проблемы имеет вопрос о

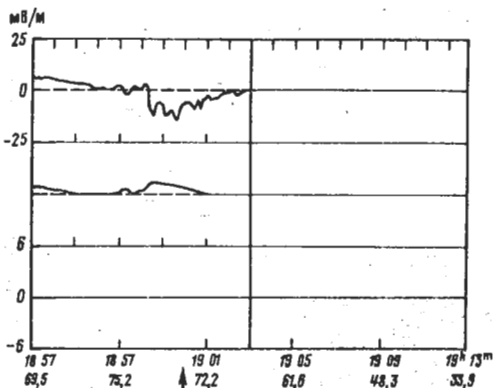
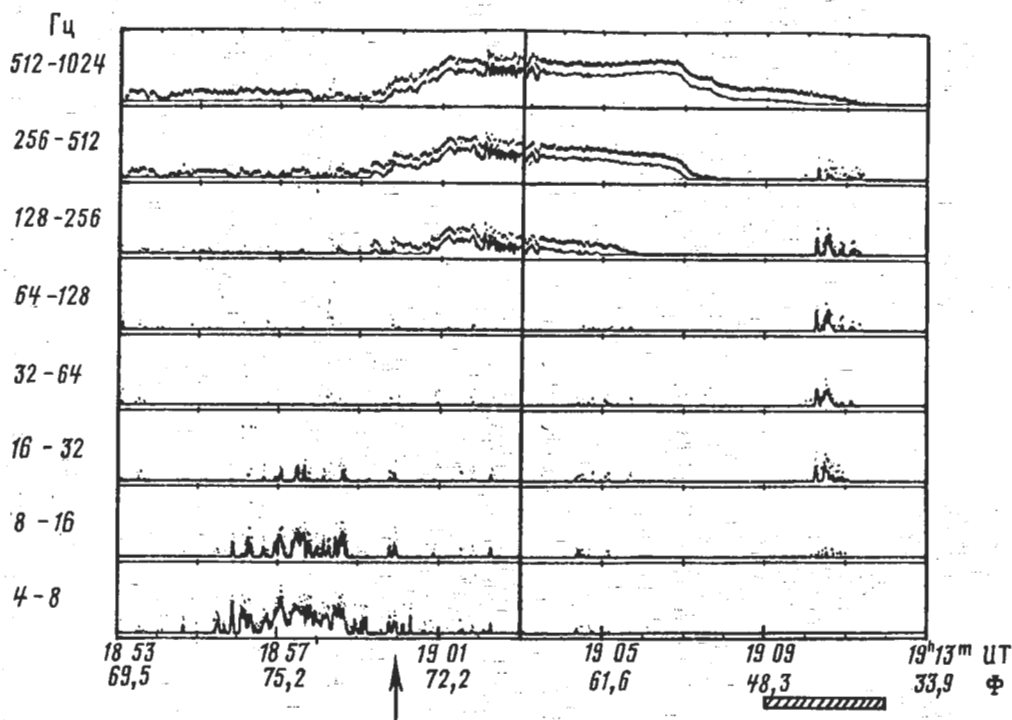


Рис. 3. Векторные измерения квазистационарного электрического поля на DE-2 1 X 1981 (орбита 875). По горизонтальной оси — время UT и инвариантная широта Φ

Рис. 4. Вариации интенсивности переменного электрического поля по данным 8-канального спектрометра на DE-2. Полосы пропускания каждого фильтра приведены на левой стороне графика



возможном времени жизни "пятна" мелкомасштабных плазменных шумов. Определяющим процессом является диффузия, размывающая возникающую неоднородность. Характерное время диффузии может быть оценено из соотношения

$$(1) \quad \tau = l^2/D,$$

где l — характерный поперечный размер неоднородности, D — коэффициент диффузии. Для классической амбиполярной диффузии в качестве оценки D можно взять

$$(2) \quad D = 2\nu_e r_e^2,$$

где ν — частота электрон-ионных столкновений, r_e — ларморовский радиус электро-

нов. Оценки характерных времен жизни по соотношениям (1), (2) для параметров ионосферной плазмы, соответствующих высотам наблюдения, показывают, что неоднородности с размерами $l \approx 10^2$ м релаксируют за времена порядка десятков минут, а с $l \approx 30$ м, соответственно, за первые минуты. Мелкомасштабные неоднородности с размерами менее 10 м релаксируют значительно быстрее, и, соответственно, в спектре зарегистрированной на спутнике турбулентности частоты $l > 500$ Гц должны быть сильно подавлены.

Хотя расплывание ионосферных неоднородностей является, безусловно, гораздо более сложным процессом, чем представлено выше, тем не менее, не вникая в детали, можно отметить, что индуцированное акустическим воздействием пяно электростатической турбулентности является достаточно долгоживущим образованием. Следы неоднородностей с размерами десятки–сотни метров могут наблюдаться через минуты–десятки минут после их возбуждения, что и дает возможность изучения этих эффектов на спутниках.

4. Описанные в данной работе эффекты указывают на существование достаточно эффективных неплазменных источников высокочастотной ионосферной турбулентности. Естественно, необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования в данном направлении. Однако уже сейчас можно указать на возможность применения эффектов трансформации акустических колебаний в электромагнитные в качестве физической основы для разработки ионосферного метода контроля ядерных испытаний. Хотя основную роль в верификации соглашения об ограничении мощности подземных ядерных взрывов играют сейсмические методы, но из-за сильного влияния региональной геологии надежная дискриминация взрывов и землетрясений зачастую представляет значительные трудности [13]. Поэтому ионосферные и спутниковые методы могут служить дополнительным средством контроля за проведением подземных ядерных взрывов.

Из общих соображений следует, что взрыв как когерентный источник акустического возмущения должен вызвать больший эффект в ионосфере, чем некогерентный источник – землетрясение. Эти соображения подтверждаются результатами работы [14], указывающими, что ионосферный эффект непосредственно над эпицентром землетрясения оказывается значительно слабее, чем от сформировавшейся рэлеевской волны на удалении от эпицентра. Идея использования ионосферных возмущений в качестве альтернативного метода детектирования и идентификации подземных ядерных взрывов была предложена сотрудниками Ливерморской национальной лаборатории США [15]. Результаты численных расчетов ионосферного отклика хорошо совпали с зарегистрированной формой импульса во время натурального эксперимента Mill Race с наземным химическим взрывом, проведенного в 1981 г. Лос-Аламосской лабораторией [15]. По нашему мнению, спутниковые наблюдения могли бы дополнять сейсмические и ионосферные методы контроля подземных ядерных взрывов. К достоинствам последних следует отнести то, что они могут быть осуществлены национальными средствами, без установки аппаратуры на полигонах.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Академии наук СССР, Москва
Годдардовский центр космических полетов НАСА

Поступило
23 VI 1989

ЛИТЕРАТУРА

1. Альперович Л.С., Пономарев Е.А., Федорович Г.В. – Изв. АН СССР. Физика Земли, 1985, т. 21, № 11, с. 816–825.
2. Карлов В.Д., Козлов С.И., Ткачев Г.Н. – Косм. исследования, 1980, т. 18, № 2, с. 266–277.
3. Blanc E. – Ann. geophys., 1985, vol. 3, № 6, p. 673–688.
4. Jacobson A.R., Carlos R.C. Preprint Los Alamos National Lab., 1987, La-CP-87-89.
5. Blanc E. – Radio Sci., 1984, vol. 19, № 2, p. 653–664.
6. Белов С.В., Горбачев Л.П., Савченко Ю.Н. – Гео-

магнетизм и аэрономия, 1973, т. 13, № 5, с. 818–824. 7. Альперович Л.С., Гохберг М.Б., Сорокин В.М., Федорович Г.В. – Изв. АН СССР. Физика Земли, 1979, № 3, с. 58–68. 8. Rokhotelov O.A., Stassinopoulos E., Vette J. et al. – Ann. Geophys., 1989 (in press). 9. Альперович Л.С., Гохберг М.Б., Дрожжев В.И. и др. – Изв. АН СССР. Физика Земли, 1985, № 11, с. 5–8. 10. Гальперин Ю.И., Гладышев В.А. и др. – Там же, с. 877–884. 11. Hoffman R.A., Schmerling E.R. – Space Sci. Instrum., 1981, vol. 5, p. 345. 12. Basu Su., Basu Sa., MacKenzie E. et al. – J. Geophys. Res., 1988, vol. 93, № A1, p. 115–136. 13. Chael E.P. – Geophys. Res. Lett., 1988, vol. 15, № 6, p. 625–628. 14. Okuzawa T., Shlbata T., Yasui H. – J. Geomag. Geoelect., 1987, vol. 35, p. 391–397. 15. Warshaw S.I., Dubols P.F. – Energy Technol. Rev., 1983, vol. 1, P. 39–49.