

12. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1968.
13. А. И. Вольперт, С. И. Худяев. Анализ в классах разрывных функций и уравнения математической физики. М.: Наука, 1975.
14. Л. И. Седов. Механика сплошной среды. Т. 2. М.: Наука, 1973.
15. Е. И. Забабахин.— В кн.: Механика в СССР за 50 лет. М., 1970.
16. А. А. Клячко, Г. М. Кунцев. ФГВ, 1978, 14, 1, 22.

УДК 551.596+536.46+532.51

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ БОЛЬШИХ ПОЖАРАХ

Ю. А. Гостинцев, Е. А. Иванов, Н. П. Копылов, Ю. В. Шацких

(Москва)

Явление генерации и распространения в атмосфере на большие ($\sim 10\,000$ км) расстояния инфразвуковых и внутренних гравитационных волн (ВГВ) при действии достаточно мощных возмущений надежно регистрируется и идентифицируется для ряда как естественных (извержения вулканов, штормовая погода, падение метеоритов, магнитные бури), так и искусственных (сильные взрывы) очагов [1]. Под инфразвуковыми волнами подразумевается низкочастотная ветвь акустического спектра с частотами меньше 1 Гц и больше предельной акустической $N_A = g\gamma/(2c_s) \approx 0,015$ рад/с, а под внутренними гравитационными — волны с частотой порядка коэффициента Вейселя — Брента $N = \sqrt{g \cdot d \ln \Theta_a / dx} \approx 0,01$ рад/с (Θ_a — потенциальная температура атмосферы).

Несмотря на известные успехи, механизм генерации волн продолжительно действующими очагами до сих пор остается неясным. В связи с этим постановка искусственных крупномасштабных экспериментов в контролируемых условиях крайне необходима. Такой эксперимент проведен в восточной области европейской части страны в августе 1982 г. В качестве источника возмущения атмосферы использован искусственно организованный крупномасштабный пожар (система костров, равномерно распределенных на площади ~ 1 га) со средним в течение 2 ч энерговыделением $\approx 3,5 \cdot 10^9$ Вт. В очаге горения (на высоте до 2 м) и на расстоянии от него ~ 500 м (метеомачта высотой 2 м) проводилась непрерывная запись пульсаций скорости ветра, а на сети удаленных пунктов (пункт А — 173 км на юго-запад от очага, Б — 1972 км на той же линии, В — 1388 км на юго-восток) — измерение пульсаций давления. Запись подвергалась фурье-анализу. Представительность такого анализа иллюстрируется на рис. 1.

На рис. 2 приведены зависимости квадрата амплитуды колебаний скорости ветра в очаге и на метеомачте от периода для инфразвуковой и акустико-гравитационной частей спектра. Видно наличие выраженных колебаний с периодами $\sim 1,5; 2,5; 4;$

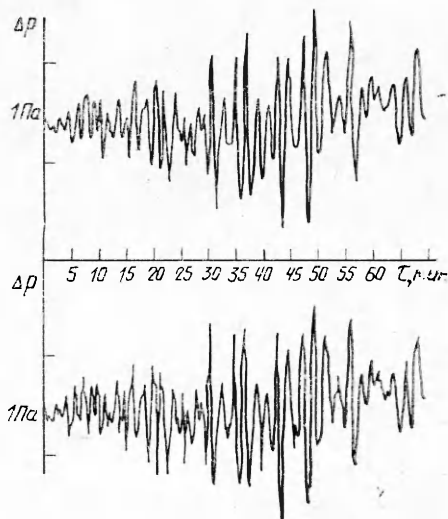


Рис. 1. Микробарограмма сигнала, принятого на станции В, за первые 70 мин (верхняя кривая) и кривая, восстановленная по гармоникам фурье-анализа сигнала (нижняя кривая).

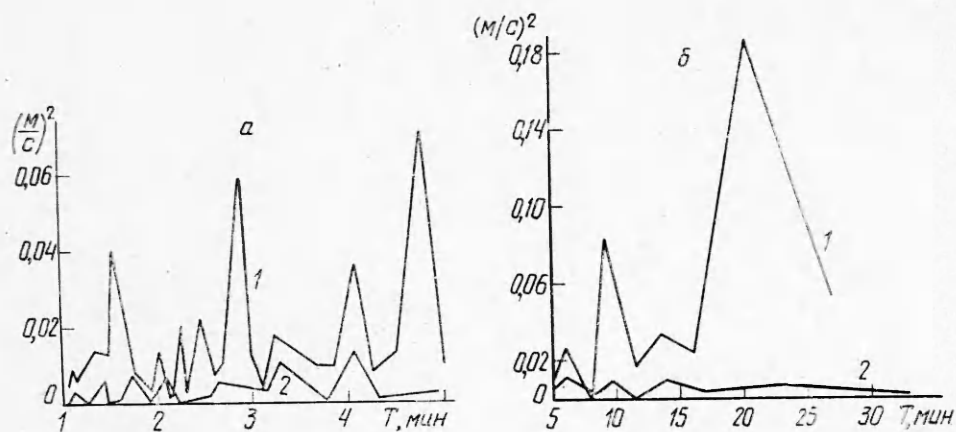


Рис. 2. Зависимость квадрата амплитуды скорости ветра от периода для инфразвуковой части (а) и акустико-гравитационной части спектра (б).
1 — в очаге; 2 — на метеомачте.

4,5; 10 и 21 мин. Интенсивность в очаге существенно выше, чем у метеомачты.

Колебания с периодом ~ 10 мин можно однозначно отождествить с основной модой внутренних гравитационных волн на высоте зависания конвективной колонки продуктов над очагом (оцененная по измерениям стратификации атмосферы для этой высоты $N = 0,0115$ рад/с, а период $T = 2\pi/N \approx 9,1$ мин), т. е. с колебаниями зависшего около уровня теплового равновесия облака. Подобный механизм генерации ВГВ проникающей конвекцией наблюдался в ряде случаев при наличии сильно неустойчивого (перегретого) слоя атмосферы под областью инверсии [1]. Механизм образования инфразвуковых волн не столь однозначен. Вероятно, например, что период таких волн, генерируемых источником, задается частотой срыва вихрей с боковых кромок отдельных костров и с конвективной струи над очагом в целом. Так, для периода $T = 4,5$ мин оценка размера препятствия по формуле для частоты срыва вихрей с обтекаемого цилиндра $Sh = D/vT = 0,21$ [2] при измеренной средней скорости ветра $v = 1,5$ м/с дает $D = 85$ м, что близко к размеру очага. Для $T = 1$ мин $D \approx 19$ м по порядку сравнима с поперечным размером отдельного костра (12×12 м²). Появление промежуточных гармоник можно было бы объяснить взаимодействием вихрей при обтекании решетки препятствий. В [1] обсуждается альтернативный механизм генерации инфразвука крупномасштабными турбулентными пульсациями в конвективной струе. Обе концепции не свободны от критических замечаний и нуждаются в дальнейшей экспериментальной проверке.

Сгенерированные пожаром возмущения распространялись в атмосфере, трансформируясь в соответствии с изменением метеоусловий на пути их следования. Средняя скорость распространения сигнала, оценен-

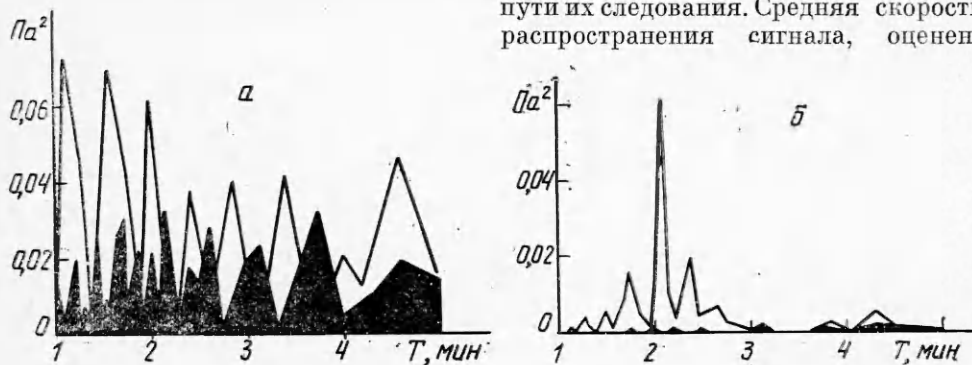


Рис. 3. Зависимость квадрата амплитуды возмущения давления инфразвуковых волн от периода на станциях А (а) и В (б) (уровень шума зачернен).

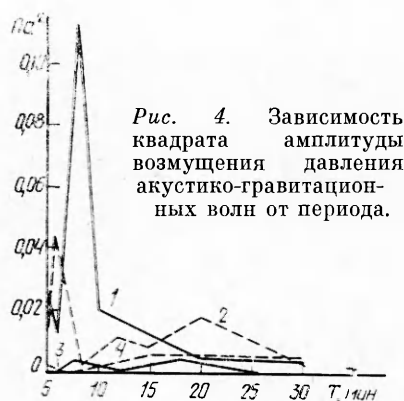


Рис. 4. Зависимость квадрата амплитуды возмущения давления акустико-гравитационных волн от периода.



Рис. 5. Энергетический спектр сигнала, принятого на станции А, в зависимости от частоты.

ная по его приходу в пункты А, Б, В, равнялась 320 ± 8 м/с. На рис. 3 представлены зависимости квадрата амплитуды возмущения давления инфразвуковых волн от периода, принятые на станциях А и В (уровень шума зачерчен). На рис. 4 даны аналогичные зависимости для ВГВ (линии 1, 2 — сигнал и шум в пункте А, 3, 4 — сигнал и шум в В). Видно, что с увеличением расстояния от источника выделяются две характерные акустические волны с периодами ~ 2 мин и $2\pi/N_A \sim 4,5$ мин. Волна плавучести основной гармоники (~ 9 мин) распространяется, не меняя своей частоты.

Энергия акустических волн на станциях А, Б, В за 1 ч, оцененная по формуле Тейлора $E = 2\pi RH \cdot \sin \varphi (\rho_s c_s)^{-1} \int \Delta p^2 dt$ ($2\pi R \cdot \sin \varphi$ — расстояние до источника; H — высота слоя гомогенной атмосферы; ρ_s, c_s — плотность и скорость звука на уровне земли; Δp и t — давление и время), составила соответственно $3,8 \cdot 10^{17}$, $4,3 \cdot 10^{17}$ и 10^{18} эрг. Таким образом, только 0,3—0,8% общей энергии пожара излучалось в виде волн. Эта величина существенно ниже коэффициента излучения взрывных источников (вулканов, бомб [3]) из-за относительно малой (по сравнению с c_s) скорости движения конвективного облака. Кроме этого, большая часть энергии в спектре излучения мягкого источника, каковым является пожар, по крайней мере в ближней зоне (~ 200 км), приходится на внутренние гравитационные волны (рис. 5).

На станциях А и В величины плотностей акустической энергии $E_1 = \Delta p^2 / \rho_s c_s^2$ были равны $1,3 \cdot 10^{-7}$ и $4,7 \cdot 10^{-8}$ Дж/м³, поток энергии $F = \Delta p^2 / \rho_s c_s = 4,4 \cdot 10^{-5}$ и $1,6 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². Для сравнения отметим, что зафиксированные во время локально-штормовой погоды (с кинетической энергией шторма $2,8 \cdot 10^{13}$ Дж и мощностью $2,8 \cdot 10^{10}$ Вт) величины E_1 и F составили на расстоянии 1000 км $7,2 \cdot 10^{-8}$ Дж/м³ и $2,4 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² (оцененный при этом коэффициент излучения акустической энергии составил 0,1%) [1].

В результате проведенного исследования установлено, что большие пожары являются сильным природным источником волновых возмущений атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. A. Gossard, W. H. Hooke. Waves in the Atmosphere. Amsterdam — Oxford — New York: Elsevier Sci. Publ. Co., 1975.
2. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.
3. G. S. Gorshkov. Bull. volcanol., 1960, II, XXIII, 141.