

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2021 г. Ю. С. Рыбнов^{1, *}, А. А. Спивак¹, В. А. Харламов¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: rybnov.y@mail.ru

Поступила в редакцию 10.02.2021 г.

После доработки 26.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Приводится сравнительный анализ подходов и методов оценки энергии источников акустико-гравитационных волн в атмосфере Земли на основе результатов их регистрации. Рассмотрен ряд известных зависимостей между параметрами зарегистрированных инфразвуковых сигналов и энергией источника. Обсуждается феноменологическая модель распространения инфразвуковых сигналов от мощных взрывных источников в стратосферном волноводе. На основе модели с учетом принципа энергетического подобия спектров акустико-гравитационных волн разработан новый подход к определению энергии источника, в котором в качестве определяющего параметра выбрана преимущественная частота распространяющегося в атмосфере сигнала. Показано, что результаты теоретических оценок энергии источника, выполненных с использованием разработанного подхода, согласуются с данными инструментальных наблюдений. Определены погрешности оценки энергии источников акустико-гравитационных волн при использовании известных и разработанного подходов.

Ключевые слова: акустические-гравитационные волны, амплитуда, спектр, источник, энергия.

DOI: 10.31857/S0002333721050185

ВВЕДЕНИЕ

Исследование динамических процессов в земной атмосфере и, в частности, характеристик энергетических потоков и их перераспределения во внешних и внутренних геосферах, а также причинно-следственных связей в системе взаимодействующих геосфер представляет важное научное и практическое значение. В зависимости от их мощности энергообменные процессы способны в ряде случаев вызвать нарушение природного геофизического равновесия в зонах промышленного освоения недр, в местах расположения инженерно-технических сооружений и местах повышенной тектонической активности. В связи с этим возникает потребность в формировании систем мониторинга инфразвуковых источников естественного и искусственного происхождения. Интегральный анализ инфразвуковых данных предоставляет возможности осуществлять верификацию источника акустической энергии, производить его локацию и оценивать энергию. Накопленный в ИДГ РАН опыт проведения исследований инфразвуковых полей показывает, что решение этих задач возможно на основе комплексного подхода, использующего современные методы анализа и обработки данных наблюдений

с привлечением информации об энергии потенциальных источников инфразвуковых колебаний, условий их распространения и регистрации на фоне шума.

При этом, пожалуй, наиболее важной является задача, связанная с определением энергии природного или техногенного события с оценкой погрешности.

В настоящей работе приводится сравнительный анализ существующих методов оценки энергии источников акустико-гравитационных волн (АГВ) в атмосфере Земли. В качестве исходных данных использовались волновые формы и соответствующие им амплитудно-частотные характеристики сигналов от взрывных источников с известной энергией [Stevens et al., 2006; Рыбнов и др., 2014; Адушкин и др., 2020].

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКА ПО АМПЛИТУДЕ СИГНАЛА

В ранних работах оценка энергии источника АГВ в атмосфере выполнялась на основе данных об амплитуде зарегистрированного сигнала. При этом использовалась зависимость между энерги-

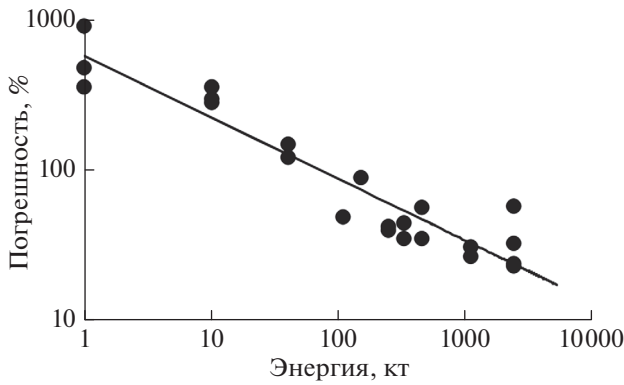


Рис. 1. Погрешность оценки энергии источника акустико-гравитационных волн по амплитуде сигнала.

ей источника q и амплитудой сигнала ΔP [Stevens et al., 2006; Ens et al., 2012]:

$$\lg q \approx -4.46 + 1.41 \lg \Delta P + 2.19 \lg R - K_1(\Delta P) \times K_2(\Delta P), \quad (1)$$

где: q – энергия источника в килотоннах тротила¹ (кт); R – расстояние до источника в км;

$\Delta P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P(t)^2 dt}$ – среднеквадратическая амплитуда сигнала в Па; T – длительность сигнала в секундах; $P(t)$ – волновая форма сигнала.

Коэффициенты $K_1(\Delta P)$ и $K_2(\Delta P)$ в зависимости (1) учитывают влияния сезонных вариаций скорости и направления ветра, а также азимут на источник сигнала в точке регистрации [Stevens et al., 2006; Адушкин и др., 2020].

Анализ данных позволяет оценить погрешность оценки энергии источника в рассматриваемом случае (рис. 1). При получении зависимости, приведенной на рис. 1, привлекались данные, полученные в результате регистрации акустических (инфразвуковых) сигналов при воздушных взрывах с известными тротильными эквивалентами в диапазоне 1–2400 кт на различных эпицентральных расстояниях (≈ 1100 – 3500 км). Среднее значение погрешности оценки энергии источника составляет в данном случае большую величину $\approx 162 \pm 108\%$.

Это связано с тем, что рассматриваемый подход был разработан для оценки энергии мощных источников (более 100 кт). Для маломощных же источников амплитуда зарегистрированных на больших эпицентральных расстояниях, а следовательно, и оценка энергии источника существенно зависят: 1) от скорости и направления

ветра на высоте стратосферы (40–50 км) и 2) от метеоусловий в пункте регистрации.

Это особенно заметно для источников с энергией менее 10 кт. Расчеты показывают, что оценки энергии таких маломощных взрывов в данном случае могут отличаться в 4–9 раз. Подобный вывод сделан в работе [Stevens et al., 2006], в которой анализировалась зависимость энергии взрывного источника от амплитуды инфразвуковой волны на различных эпицентральных расстояниях. Очевидно, что амплитудные параметры сигналов не могут быть положены в основу метода оценки энергии источников на больших расстояниях, особенно маломощных.

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКА ПО ХАРАКТЕРНОЙ ЧАСТОТЕ В СПЕКТРЕ СИГНАЛА

Известен подход для оценки энергии источника, основанный на использовании характерной частоты f_0 , соответствующей максимуму спектральной плотности [Stevens et al., 2006; Ens et al., 2012; Ророва et al., 2013]. Зависимость $q(f_0)$ в данном случае представима в виде:

$$\lg q \approx 0.65 - 2.3 \lg f_0 - 0.49 \lg R + K_3(f_0) \times K_4(f_0). \quad (2)$$

Значения коэффициентов $K_3(f_0)$ и $K_4(f_0)$ в зависимости (2), учитывающих соответственно влияние сезонных вариаций скорости и направления ветра и азимут на источник сигнала в точке регистрации. Функциональная зависимость (2) получена на основе данных по взрывам с тротильным эквивалентом 1–2400 кт (регистрация выполнялась микробарометрами с полосой пропускания ≈ 0.008 – 0.2 Гц) [Stevens et al., 2006].

На рис. 2 приведена зависимость погрешности оценки энергии источника q для воздушных взрывов по зависимости (2). Среднее значение погрешности оценки энергии источника составляет в этом случае $\approx 82 \pm 50\%$.

Видно, что оценка энергии источника по характерной частоте повышает точность оценки приблизительно в 2 раза по сравнению с подходом, использующим амплитудную зависимость (1).

Как показано в работе [Адушкин и др., 2020], основной вклад (до 80%) в оценку энергии источника, по приведенной выше зависимости (2), вносят взрывы мощностью 250–1500 кт. По этой причине следует ожидать, что оценка энергии для взрывов мощностью менее 10 и более 1500 кт по зависимости (2) будет иметь достаточно большую погрешность.

Например, колебания давления от мощного взрыва ≈ 2400 кт, зарегистрированного микробарометром с полосой пропускания 0.003–0.3 Гц на

¹ Энергию источника АГВ взрывного типа традиционно выражают в виде “тротильного эквивалента” заряда тротила (ТНТ) и измеряют в килотоннах или мегатоннах этого ВВ.

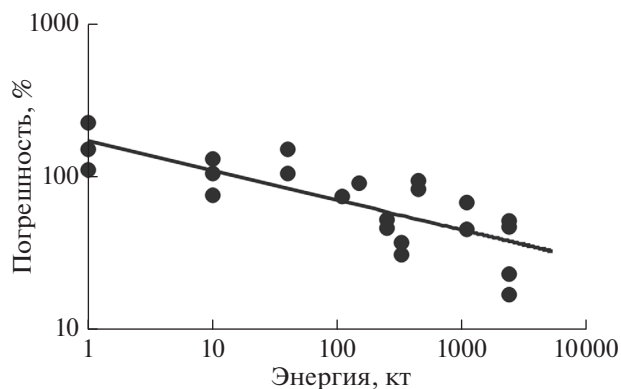


Рис. 2. Погрешность оценки энергии источника по характерной частоте в спектре сигнала.

расстоянии около 5000 км, имеют характерную частоту $f_0 \approx 0.0055$ Гц [Stevens et al., 2006]. В этом случае оценка энергии по функциональной зависимости (2) дает значение ≈ 24000 кт, что на порядок превышает энергию реального события.

В случае взрыва малой мощности (≈ 1 кт) сигнал, зарегистрированный микробарометром с полосой пропускания 0.003–0.5 Гц на расстоянии около 1000 км, имеет характерную частоту $f_0 \approx 0.12$ Гц [Адушкин и др., 2020]. В этом случае оценка энергии по функциональной зависимости (2) дает значение ≈ 20 кт, что значительно превышает энергию реального события.

Приведенный выше анализ показал необходимость разработки новых подходов к оценке энергии источников взрывного типа. В работе [Адушкин и др., 2020] предложено оценивать энергию источника на основе решения двумерной задачи, связанной с анализом спектра многократно отраженного сигнала $S_m(\omega)$ (рис. 3).

При распространении в стратосферном волноводе высотой Z_S , спектр сигнала $S_m(\omega)$, зарегистрированного на расстоянии R , записывается в виде [Бреховских, 1973]:

$$S_m(\omega) = S_0(\omega) \Psi(R, Z_S, \omega), \quad (3)$$

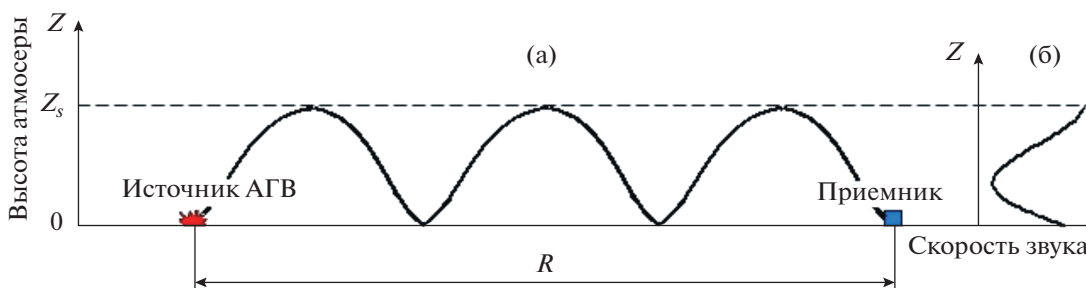


Рис. 3. Схема распространения АГВ в стратосферном волноводе (а); стратификация скорости звука в стандартной атмосфере (б).

где: $\Psi(R, Z_S, \omega)$ – функция волноводного канала; $S_0(\omega)$ – спектр сигнала в источнике как характеристика его энергии.

В этом случае давление в акустической волне с учетом расстояния до источника можно представить в виде следующего разложения в интеграл Фурье [Пеликовский и др., 1979; Голубев и др., 1986]:

$$P(t) = R \int_{-\infty}^{+\infty} S_m(\omega) \Psi(R, Z_S, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (4)$$

С учетом результатов работ [Бреховских, 1973; Голубев и др., 1986; Петухов, 1992; Петухов и др., 2013] для случая, когда приемник расположен на земной поверхности и, при условии полного отражения от верхней границы стратосферы и от поверхности Земли, получаем [Куличков, 1989; Буш, 1986]:

$$\Psi(R, Z_S, \omega) = \int_0^\omega \frac{2[\exp(bZ_S) + \exp(-bZ_S)]}{1 - \exp(2bZ_S)} \times [H_0^{(1)}(kR \sin \theta)] \sin \theta d\omega \quad (5)$$

где: $k = \omega/C$ – волновое число; C – скорость звука; $b = ik \cos \theta$; θ – угол падения; $H_0^{(1)}(kR \sin \theta)$ – функция Ханкеля первого рода.

Видно, что при таком подходе спектр зарегистрированного сигнала включает в себя информацию не только об энергии источника, но и о характеристике трассы распространения (расстояние, коэффициенты отражения и др.) [Адушкин и др., 2020].

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ НА ПРИНЦИПЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ СПЕКТРОВ

Подход, основанный на энергетическом подобии спектров регистрируемого акустического сигнала, был предложен М.А. Садовским. В развитие этого подхода в работах [Рыбнов и др., 2014] было предложено использовать интегральную зависимость энергии от спектра сигнала в виде:

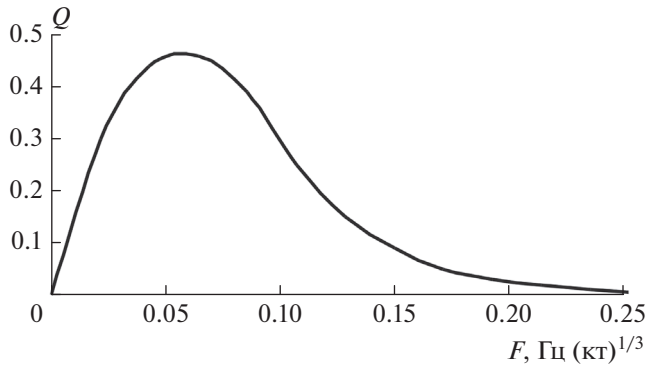


Рис. 4. Усредненный нормированный спектр.

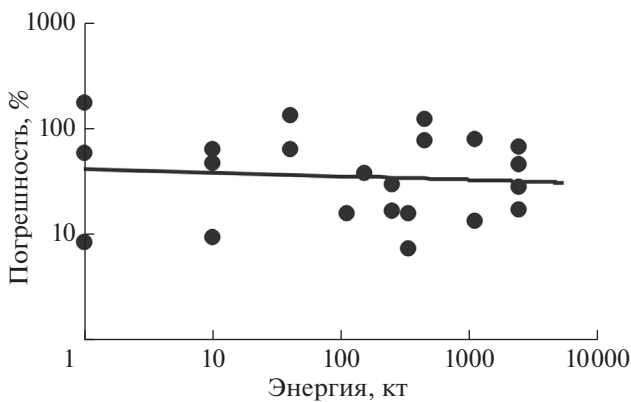


Рис. 5. Погрешность оценки энергии источника на основе принципа энергетического подобия спектров.

$$q(f) = \frac{1}{2\pi\rho C} \int_{f_H}^{f_B} |S(f)|^2 df, \quad (6)$$

где: ρ – плотность воздуха; $S(f)$ – спектр зарегистрированного сигнала; f_B, f_H – верхняя и нижняя частоты в спектре сигнала по уровню –6 дБ.

С целью получения зависимости $q(f_0)$ в настоящей работе рассматривалось отношение интегральной величины энергии $q(\Delta f)$ в октавной полосе частот $\Delta f \in [f_H, f_B]$ к полной энергии сигнала, вычисленного по (6). Для обеспечения энергетического подобия полученные спектры нормировались на величину $q^{1/3}$ [Садовский, 1952]. На рис. 4 показана зависимость усредненного нормированного спектра от частоты f для источников с $q = 1-2400$ кт. По оси абсцисс отложена величина $F = f^3\sqrt{q}$, по оси ординат $Q = \frac{q(\Delta f)}{q}$. В этом случае площадь под кривой равна единице, что определяет энергетическое подобие спектров. Максимум распределения приходится в среднем на $f^3\sqrt{q} \approx 0.064$ [Рыбнов и др., 2014].

В рассмотренном подходе зависимость между энергией источника q и характерной частотой f_0 представима в виде [Адушкин и др., 2020]:

$$q = \frac{1.7 \times 10^{-2}}{f_0^{2.41}}. \quad (7)$$

Погрешность оценки энергии источника q для воздушных взрывов по зависимости (7) приведена на рис. 5. Среднее значение погрешности оценки энергии источника составляет в этом случае $\approx 52 \pm 43\%$.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКОВ АГВ

Подход рассмотрен в работах [Адушкин и др., 2020], где в рамках феноменологической модели распространения акустического сигнала на значительные расстояния от источника исследовался спектр многократно отраженного сигнала. Показано, что в реально стратифицированной атмосфере наибольший интерес представляет рассмотрение распространения АГВ в стратосферном волноводе [Куличков и др., 2004].

Рассматривалось распространение акустического сигнала, неоднократно (m раз) отраженного от верхней границы стратосферы. В работах [Голубев и др., 1986; 1988; Петухов, 1992; Петухов и др., 2013] в приближении геометрической акустики с использованием соотношения (5) получено выражение для спектра сигнала $S_m(\omega)$, отраженного m раз от верхней границы стратосферы:

$$S_m(\omega) \approx S_0(\omega)(-1)^{m-1} \times \left\{ \frac{\exp[-ik(\omega)K_1(R)]}{K_1(R)} - \frac{\exp[-ik(\omega)K_2(R)]}{K_2(R)} \right\} \times \left\{ \frac{\exp[-ik(\omega)K_3(R)]}{K_3(R)} + \frac{\exp[-ik(\omega)K_4(R)]}{K_4(R)} \right\}, \quad (8)$$

где: $K_1(R) = \sqrt{R^2 + [2(m-1)Z_S]^2}$; $K_2(R) = \sqrt{R^2 + [2mZ_S]^2}$; $K_3(R) = K_2(R)$; $K_4(R) = \sqrt{R^2 + [2(m+1)Z_S]^2}$.

Анализ зависимости (8) свидетельствует о том, что максимум в спектре отраженного сигнала сместился по сравнению со спектром исходного сигнала в область более низких частот. Это в полной мере согласуется с известными выводами работ [Куличков и др., 1985; 2004; Петухов и др., 2013].

В рамках рассматриваемого подхода анализировалось распространение слабой ударной волны при многократном отражении [Адушкин и др., 2020]. Ударная волна считалась слабой, начиная с относительных расстояний $R_0 \geq 10q^{1/3}$ м [Губкин, 1961; Коротков, 1964; Murphy, 1972].

Спектр слабой ударной волны принимался в виде:

$$S_0(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta P(t) \exp(i\omega t) dt = \frac{i\omega\tau_*}{(1 - i\omega\tau_*)^2}, \quad (9)$$

где длительность фазы сжатия на расстоянии R_0 составляет [Губкин, 1978]:

$$\tau_* = 47 \frac{q^{2/3}}{\Delta P R_0}, \quad (10)$$

а давление на фронте слабой ударной волны:

$$\Delta P = \frac{1.35q^{1/3}}{R_0 \sqrt{\ln\left(\frac{R_0}{2.7q^{1/3}}\right)}}. \quad (11)$$

На расстоянии $R \gg R_0$ спектр импульса имеет вид [Murphy, 1972]:

$$S(\omega) = \frac{i\omega T(R)}{[1 - i\omega T(R)]^2}, \quad (12)$$

где: $T(R) = \tau_* \left(\frac{R_r}{R_0}\right)^{1/3}$; $R_r = \frac{\sqrt{R^2 + (2mZ_m)^2}}{2m}$ – расстояние, которое сигнал с кратностью отражения m проходит первый раз от источника до высоты отражения (рис. 3).

Выполненные расчеты для $m = 1-20$ (200–4000 км) показывают, что зависимость $S_m(\omega)$ от числа отражений или расстояния описывается простым выражением:

$$S_m(\omega) \approx S_0(\omega) \frac{K}{m^n}. \quad (13)$$

При высоте отражения $\approx 45-49$ км, коэффициенты K и n будут, соответственно, равны 0.627–0.607 и 0.203–0.217.

С целью построения феноменологической модели распространения АГВ на основе предложенного подхода нами были выполнены расчеты теоретических значений частоты f_0 для некоторых взрывов в атмосфере, для которых известны энергия источника q и расстояния, на которых была зарегистрирована акустическая волна. Данные по их энергии и расстояниям до пункта регистрации приведены в работе [Адушкин и др., 2020]. Спектр сигнала на известном расстоянии от каждого взрыва и его характерная частота вычислялись по зависимостям (9)–(13).

Результаты оценки значений q , выполненные по феноменологической модели, позволяют представить зависимость q в виде [Адушкин и др., 2020]:

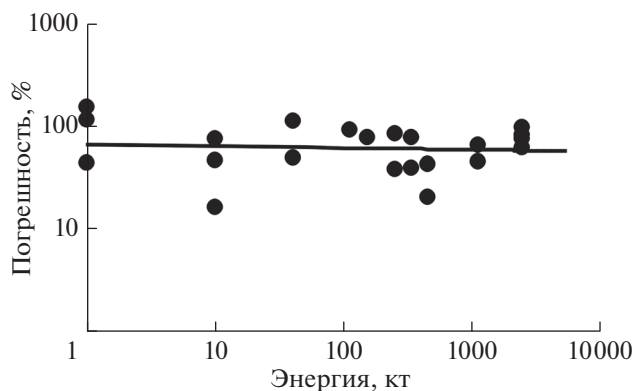


Рис. 6. Зависимость погрешности оценки энергии источника по феноменологической модели.

$$q = \frac{2.6 \times 10^{-2}}{f_0^{2.33}}. \quad (14)$$

На рис. 6 приведена погрешность оценки энергии источника q для воздушных взрывов, вычисленная по зависимости (14). Среднее значение погрешности оценки энергии источника составляет $\approx 69 \pm 33\%$.

Для корректировки предложенного подхода был проведен сравнительный анализ теоретических значений $f_0(q)$ для калибровочных взрывов и значений, полученных из волновых форм, зарегистрированных при этих событиях акустических сигналов [Адушкин и др., 2020].

В результате оценку энергии источника с приемлемой для практических оценок точностью рекомендуется проводить с использованием зависимости, полученной в результате комплексного подхода (теория плюс экспериментальные данные):

$$q = \frac{1.9 \times 10^{-2}}{f_0^{2.27}}. \quad (15)$$

На рис. 7 приведена зависимость погрешности оценки энергии источника q для воздушных взрывов по зависимости (15). Среднее значение погрешности оценки энергии источника составляет $\approx 44 \pm 41\%$.

Для сравнения в таблице приведены погрешности оценок энергии источников по рассмотренным зависимостям.

Графически вариации погрешностей оценок энергии источников приведены на рис. 8. Как следует из рис. 8, комплексный подход (зависимость (15)) позволяет проводить оценку энергии источника акустических колебаний наилучшим образом практически во всем диапазоне энергий.

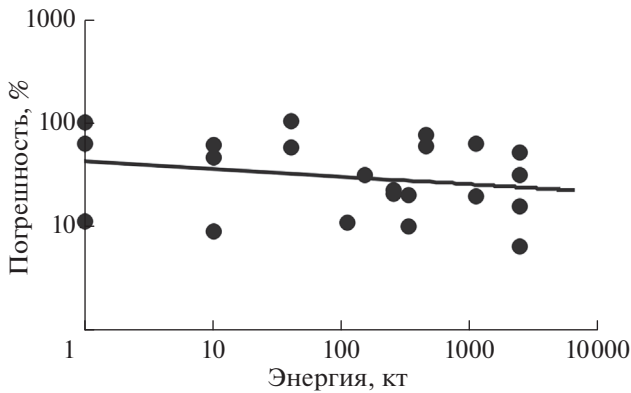


Рис. 7. Зависимость погрешности оценки энергии источника с использованием зависимости (15).

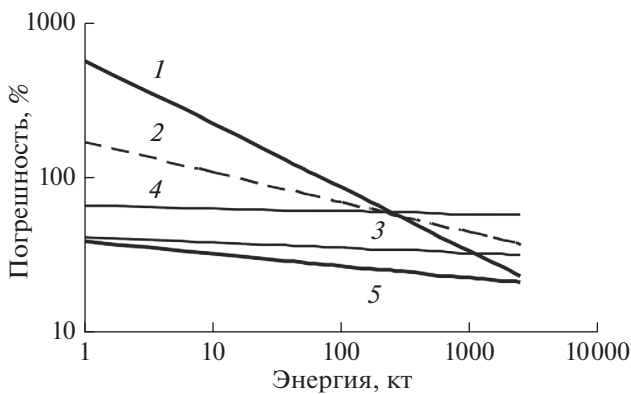


Рис. 8. Вариации погрешностей оценок энергии источников при использовании разных подходов: 1 – по амплитуде сигнала (зависимость (1)); 2 – по характерной частоте (зависимость (2)); 3 – на основе использования энергетического подобия спектров (зависимость (7)); 4 – на основе феноменологической модели (зависимость (14)); 5 – на основе комплексного подхода (зависимость (15)).

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ АГВ ПО КОМПЛЕКСНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Проверка комплексной зависимости (15) выполнялась с использованием данных регистрации акустических сигналов, вызванных техногенными и природными источниками с известной энергией.

Извержение вулкана. Это было сильное эксплозивное (взрывного типа) извержение [Donn,

Balachadran, 1981]. Сигнал от извержения вулкана Сент-Хеленса был зарегистрирован на расстоянии ≈ 8000 км в восточном направлении, а характерная частота в спектре сигнала $f_0 \approx 0.002$ Гц [Donn, Balachadran, 1981]. Как показано в работах [Reed, 1972; Губкин, 1969], взрывная аналогия к оценке энергии природных источников по энергетическим характеристикам находится в хорошем согласии с волнами от химических взрывов. Тогда оценочное значение энергии для рассматриваемого события, полученное по формуле (15), составляет $\approx 2.6 \times 10^4$ кт, что хорошо согласуется с данными, приведенными в работе [Donn, Balachadran, 1981], в которой оцененная энергия извержения вулкана Сент-Хеленса составляет $\approx 3.5 \times 10^4$ кт.

Цунами. 11.03.2011 г. у побережья Японии произошло мощное землетрясение, которое вызвало цунами. Низкочастотные колебания атмосферного давления были зарегистрированы многими инфразвуковыми станциями, в том числе и геофизической обсерваторией “Михнево” ИДГ РАН. Характерная частота в спектре сигнала $f_0 \approx 0.0018$ Гц [Адушкин и др., 2020]. Оценка энергии цунами по (15) равна $\approx 3.2 \times 10^4$ кт, что с приемлемой для практических оценок точностью совпадает с данными USGS – $(4.4-4.6) \times 10^4$ кт.

Взрыв болида. 21.06.2018 г. на границе Липецкой и Тульской обл. в районе п. Озерки приблизительно в 01:15 УТ взорвался болид [Вагураев et al., 2019]. Сигналы от взрыва болида были зарегистрированы в ГФО “Михнево”, ЦГМ ИДГ РАН в Москве и микробарометром на территории обсерватории ИНАСАН в Звенигороде (расстояние $\approx 350-390$ км). Характерная частота в спектре сигнала $f_0 \approx 0.1$ Гц, а оценка энергии по (15) равна ≈ 3.5 кт. НАСА по эффективной светимости оценила энергию ≈ 3 кт.

Мощный взрыв с энергией ≈ 2400 кт, зарегистрированный на расстоянии около 5000 км, имеет характерную частоту $f_0 \approx 0.0055$ Гц. Оценка энергии по (15) дает значение ≈ 2600 кт, что хорошо согласуется с реальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка энергии акустического источника важна при разработке мер предупреждения и оперативного реагирования на аварийные и ката-

Таблица 1

Погрешность оценок энергии источника				
по зависимости (1)	по зависимости (2)	по зависимости (7)	по зависимости (14)	по зависимости (15)
$\approx 162 \pm 108\%$	$\approx 82 \pm 50\%$	$\approx 52 \pm 43\%$	$\approx 69 \pm 33\%$	$\approx 44 \pm 41\%$

строфические явления природного и техногенного происхождения.

Трудности с оценкой энергии источников АГВ по параметрам зарегистрированного сигнала связаны со сложными условиями распространения инфразвуковых волн в реальной атмосфере. Причем чем дальше от источника проводится регистрация и чем меньше энергия в очаге, тем большее влияние оказывают условия вдоль трассы распространения акустического сигнала на его амплитудно-частотные характеристики.

Полученные в настоящей работе данные свидетельствуют о том, что предложенный подход к оценке энергии акустического источника характеризуется наименьшей погрешностью и может быть рекомендован для практического использования. При этом следует отметить, что построенный на основе привязки к событиям взрывного типа подход применим к событиям, при которых энергия выделяется в течение конечного временного интервала (вулканические извержения и сильные пожары) [Адушкин и др., 2020].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования (тема АААА-А-19-119021890067-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Инфразвук в атмосфере. М.: ТОРУС ПРЕСС. 2020. 320 с.
- Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1973. 343 с.
- Буш Г.А., Грачев А.И., Иванов Е.А. и др. Об аномальном распространении звука в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1986. Т. 22. № 1. С. 91–94.
- Голубев В.Н., Орлов Е.Ф., Петухов Ю.В. Спектральные характеристики импульсных сигналов многократно отраженных от слоистого дна и поверхности океана // Акуст. журн. 1986. № 4. Т. 32. С. 462–467.
- Голубев В.Н., Петухов Ю.В., Шаронов Г.А. О соответствии энергетических характеристик широкополосных импульсных сигналов донных отражений различной кратности // Акуст. журнал. 1988. Т. 34. № 3. С. 453–458.
- Губкин К.Е. Нелинейная геометрическая акустика и ее приложения. Некоторые проблемы математики и механики. Новосибирск: изд-во СО АН СССР. 1961. С. 69.
- Губкин К.Е. О подобии взрыва // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. № 10. С. 49–60.
- Коротков П.Ф. О нелинейной геометрической акустике. Слабые ударные волны // Прикладная механика и техническая физика (ПМТФ). 1964. № 5. С. 30.
- Куличков С.Н. О коэффициенте отражения акустических волн от верхней стратосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 7. С. 688–694.
- Куличков С.Н., Авиллов К.В., Буш Г.А. и др. Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 3–12.
- Пелиновский Е.Н., Петухов Ю.В., Фридман В.Е. Приближенные уравнения распространения мощных акустических сигналов в океане // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1979. № 4. Т. 15. С. 436–444.
- Петухов Ю.В. Теория отражения взрывных волн давления от верхней стратосферы и формирование областей аномальной слышимости. Препринт № 313. Горький. НИРФИ. 1990. 24 с.
- Петухов Ю.В., Разин А.В., Собисевич А.Л., Куликов В.И. Сейсмоакустические и акустико-гравитационные волны в слоистых средах. М.: ИФЗ РАН. 2013. 280 с. <https://yadi.sk/i/sYdRCo0TdsJHC>
- Рыбнов Ю.С., Попова О.П., Харламов В.А. Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления. Динамические процессы в геосферах. Вып. 5: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2014. С. 78–85.
- Садовский М.А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва // Физика взрыва. 1952. № 1. Изд-во АН СССР.
- Ens T.A., Brown P.G., Edwards W.N., Silber E.A. Infrasound production by bolides: A global statistical study // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2012. V. 80. P. 208–229.
- Hunt J.N.R., Palmer R., Penny W. Atmospheric waves caused by large explosions // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1960. V. 252. 275 p.
- Murphy B.L. Variation rayleigh-wave amplitude with yield and height of burst for intermediate-amplitude nuclear detonations // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. № 5. P. 808–817.
- Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.
- Reed J.W. Air blast overpressure decay at long rangel // J. Geoph. Res., 1972. V. 77. № 9. P. 1623–1629.
- Stevens J.L., Adams D.A., Baker G.E., Xu H., Murphy J.R., Divnov I., Bouchik V.N. Infrasound Modeling Using Soviet Explosion Data and Instrument Design Criteria from Experiments and Simulations. Technical Report ADA446517S. 2006.
- Varypaev A., Volosov S., Konstantinovskaya N., Nesterkina M., Kharlamov V., Rybnov Y. Seismo-acoustic Effects of the Lipetsk Bolide 21.06.2018. In: G. Kocharyan, A. Lyakhov (eds.). Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_63

Analysis of the Methods for Energy Estimation of Acoustic-Gravity Wave Sources in the Earth's Atmosphere

Yu. S. Rybnov^{a,*}, A. A. Spivak^a, and V. A. Kharlamov^a

^aSadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

**e-mail: rybnov.y@mail.ru*

A comparative analysis is presented of the approaches and methods for estimating the energy of the sources of acoustic-gravity waves in the Earth's atmosphere from their records. A number of known relationships linking the parameters of the recorded infrasonic signals and the source energy are considered. A phenomenological model of the propagation of infrasonic signals from high-power explosive sources in the stratospheric waveguide is discussed. Based on the model and the principle of energy similarity of the spectra of acoustic-gravity waves, a new approach to source energy determination with a key parameter being the dominant frequency of the signal propagating in the atmosphere is developed. It is shown that the calculated source energy estimates obtained by the developed approach are consistent with the instrumental data. The errors of source energy estimation of the acoustic-gravity waves using the existing and developed approaches are determined.

Keywords: acoustic-gravity waves, amplitude, spectrum, source, energy