

УДК 534.321.8:551.21

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771332017119667>

Котлов В. Ю.¹, *аспирант*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФРАЗВУКА ПРИ ИЗВЕРЖЕНИЯХ ВУЛКАНОВ

En The simulation of infrasound propagation during volcanic eruptions is considered. Infrasound is considered as a factor of the informative parameter in volcanic eruptions recording.

A factor that has a significant effect on the infrasound in the atmosphere is the seismic activity. And it can be an external influence on the preparatory processes

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

and their result.

About fifty percent of infrasound is thrown into the atmosphere in the blast wave form. Such impulses spread to many kilometers from the source in the sound wave form. Their damping depends primarily on the frequency.

Eruptions monitoring of active volcanoes by remote methods is very important for ensuring the safety of aviation flights.

One of the remote methods for monitoring volcanic ash is the infrasound method, since strong eruptions are accompanied by wave perturbations in the atmosphere recorded over long distances.

It is necessary to investigate how the sound power, its intensity and sound pressure level change with volcanic eruptions.

To simulate the infrasonic waves propagation during volcanic eruption an algorithm and a program are composed. The program is written on Java programming language and consists of individual generated cycles. Calculations are performed assuming that the atmosphere with the infrasonic waves propagation, is homogeneous, layers are absent, the temperature is 20 degrees Celsius, and the sound velocity in the air in this case is 340 m / s.

Acoustic waves attenuation in the air is caused by the presence of shear and bulk viscosity and also thermal conductivity impact.

If we neglect the thermal losses, and also take into account that the bulk viscosity must be taken into account, as a rule, for high frequencies, then we can assume that the propagation loss of the traveling wave in the real environment results from the shear viscosity.

The aim of this work is the infrasound propagation simulating during volcanic eruptions by the program complex.

Currently, there is a great need for the creation of systems that combine space and ground-based observations that accurately capture key climate variables and stable functioning for several decades to determine climate variability and trends.

The method of interaction studies of space weather, natural and manmade disasters with the organisms of the noosphere of the Earth through the registration of infrasound is proposed.

Algorithms and software for calculations of acoustic infrasound field characteristics and decay in the atmosphere are developed. It was found that when $r = 5\lambda$ phase shift between the sound pressure and vibrational velocity in the far field can be neglected and they are considered to be in phase.

The results of these calculations confirmed that for the infrasonic wave propagation in the air the counting of viscous friction is not produced.

With the help of modern computers, it is possible to calculate the infrasonic waves movement in the atmosphere and use this information to predict volcanic eruptions.

Ua

Розглянуто інфразвук у якості ключового параметра під час реєстрації природних та техногенних катастроф. Проведено моделювання інфразвукових характеристик у разі виверження вулканів. Підкреслюється необхідність посилення ролі систем моніторингу у дослідженнях вулканічних інфразвукових характеристик у разі виверження вулканів. Необхідно посилити призначення системи моніторингу у дослідженнях вулканічних виверженнях шляхом реєстрації інфразвука.

Введение

В 20-том веке возникла проблема обнаружения и описания связи солнечной активности с состоянием здоровья живых организмов. Академиком В. И. Вернадским было введено понятие биосферы Земли [1]. Состояние биосферы неразрывно связано с климатическими изменениями на нашей планете, а также с проявлением природных и техногенных явлений, часто проявляющихся как катастрофы для всего живого. Начало космической эры позволило проводить наблюдение за состоянием планеты Земля более глобально.

В работах известных ученых В. И. Вернадского, А. Л. Чижевского были рассмотрены условия взаимодействия биосферы с атмосферными и космическими явлениями. В последние десятилетия на основе наблюдений Земли со спутников были проведены многочисленные исследования солнечного излучения, землетрясений, облачности, потоков космических частиц, полярных сияний, ионизации атмосферы.

Предсказать извержения вулканов невозможно без специальных исследований и мониторинга инфразвука в атмосфере. Здесь может помочь регистрация уровней излучений инфразвука и моделирование распространения инфразвука. Это определяет актуальность настоящих исследований.

Постановка задачи

Цель настоящей работы - смоделировать распространение инфразвука при извержениях вулканов с помощью программы.

Необходимо исследовать как изменяется мощность звука, его интенсивность и уровень звукового давления при вулканических извержениях.

Аналитический обзор

Фактором, который оказывает значительное влияние на колебания инфразвука в атмосфере, является сейсмическая активность. Причём она может быть внешним воздействием на подготовительные процессы и их результатом. Влияние сейсмической активности на инфразвуковые колебания атмосферы является очень сложным процессом и сводится не только к поршневному излучению колеблющихся литосферных плит. Здесь необходимо учитывать разнообразные физико-химические процессы в литосфере и в атмосфере. Инфразвуковые колебания атмосферы могут порождаться газовыми выделениями из трещин литосферы при возрастании сейсмической активности, колебаниями литосферных плит, аэрозольными неоднородностями в атмосфере.

В настоящее время существует большая необходимость в создании систем, объединяющих космические и наземные наблюдения, которые

точно фиксируют основные климатические переменные и стабильно функционируют несколько десятилетий для определения климатических колебаний и трендов.

В последние годы исследованию процессов генерации и распространения инфразвуковых волн от извержений вулканов уделяется большое внимание [2 – 6]. Инфразвук от вулканов может распространяться на расстояния в несколько тысяч километров. Например, в [3, 4] приведены примеры регистрации инфразвука на станциях, входящих в международную систему *IMS* на расстояниях до 6400 км от извержения вулкана пик Сарычев на Средних Курильских островах.

Общеизвестно, что распространение пепловых облаков на сотни и тысячи километров на высотах 8 – 15 км во время вулканических извержений представляет особую опасность для авиации.

Показательно извержение исландского вулкана Эйяфьятлайокуль в июне 2010 г., когда в течение нескольких дней было парализовано воздушное сообщение во многих странах Европы. Инфразвуковые сигналы вблизи этого вулкана приведены в [2].

Около пятидесяти процентов инфразвука выбрасывается в атмосферу в виде взрывной волны. Такие импульсы распространяются на многие километры от источника в виде звуковых волн. Их затухание в первую очередь зависит от частоты. К примеру, частоты на уровне 1 – 20 Гц, которые не улавливает человеческое ухо, распространяются на сотни километров, достигая высоты 80 км в атмосфере. Можно привести в пример извержение вулкана Кракатау в 1883 году (рис. 1), когда инфразвуковые волны от этого природного явления смогли обогнуть планету несколько раз. Сила конечного взрыва была в 10 000 раз более мощной, нежели сила атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму, а ударные волны, генерируемые извержением, были зарегистрированы по всему миру. При взрыве наблюдался самый громкий звук, услышанный человечеством - он был зафиксирован на расстоянии 4800 километров от Кракатау.

Потому мониторинг извержений действующих вулканов дистанционными методами имеет большое значение, в том числе и для обеспечения безопасности полетов авиации.

Одним из дистанционных методов мониторинга пепловой опасности может стать инфразвуковой метод, поскольку сильные извержения сопровождаются волновыми возмущениями в атмосфере, которые регистрируются на больших расстояниях [2–9]. Инфразвуковая система мониторинга ДВЗЯИ (*IMS*) состоит из 60 инфразвуковых станций, распределенных по поверхности земного шара.

Кроме того, инфразвуковой метод, по аналогии с сейсмическим методом исследования твердой Земли, может быть использован для дистанционного зондирования атмосферы в области высот 0–150 км. Для этих целей наряду с искусственными источниками (техногенные взрывы) могут

быть использованы и естественные высокоэнергетические процессы – сильные извержения.



Рис. 1. Вулкан Анак-Кракатау. Индонезия

Акустические сигналы, зарегистрированные во время сильных эксплозивных извержений вулканов Безымянный и Кизимен, позволили оценить количество пепла, выброшенного в атмосферу. Полученные данные согласуются с оценками пепла геологическими методами. Это убедительно демонстрирует эффективность использования инфразвукового метода для мониторинга сильных эксплозивных извержений.

При извержении вулкана инфразвук возникает в результате сильных конвективных процессов, происходящих во время возникновения и формирования эруптивных облаков в результате выноса продуктов извержений и их отложений на дневную поверхность, что приводит к формированию восходящей конвективной колонны, турбулентные пульсации в которой и служат источниками инфразвукового сигнала.

Моделирование распространения инфразвука при извержении вулкана

Длина инфразвуковых волн достаточно велика по сравнению с характерными размерами источника излучения, что важно помнить при моделировании распространения инфразвука. При генерации инфразвука частотой 1 Гц длина волны будет составлять 340 м, а при частоте инфразвука 20 Гц – 17 м. Исходя из этого, можно сделать вывод, что поля со сферическим фронтом волны являются наиболее распространенными акустическими полями при распространении инфразвука.

Сферичность фронта акустического поля низкой частоты подразумевает сильное уменьшение величины звукового давления с расстоянием по гиперболическому закону, что представляет собой значительную величину.

Волновое уравнение для этого случая [10]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c_0^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} \right) + \frac{2\partial p}{r \partial r}, \quad (1)$$

где p – звуковое давление,

c_0 – скорость звука в среде,

t – время,

r – расстояние от центра сферической волны до точки наблюдения.

Для моделирования распространения инфразвука составлены алгоритм и программа. Расчеты проведены для условий идеальной среды. Было принято, что атмосфера, где распространяются инфразвуковые волны, однородна, слои отсутствуют, температура составляет 20 градусов по Цельсию и скорость звука в воздухе при этом составляет 340 м/с.

Программа написана на языке *Java* [11] и состоит из отдельных сформированных циклов. Первый цикл предусматривает изменение частоты излучения от 1 Гц до 20 Гц с шагом 1 Гц.

Во втором цикле проводится расчет изменения звукового давления. Поскольку достоверными являются расчеты акустических характеристик в дальнем поле излучателя, которое начинается с расстояния от элемента излучения, который равен длине волны излучаемого звука, то введем начальное значение звукового давления p_1 в той точке, где начинается дальнее поле. Задаем величину $p_1 = 0,02$ Па и далее пошагово изменяем эту характеристику, каждый раз уменьшая ее в 10 раз. Расчеты в цикле проводятся до момента, когда изменение величины p_1 по сравнению с начальным составит 10^8 раз.

В третьем и четвертом циклах проводятся подсчеты характеристик дальнего поля излучения. Расчет разбит на два цикла, поскольку поле излучателя имеет ограничения по расстоянию в $5 \cdot 10^3$ м. При этом в третьем цикле рассчитываются характеристики в пределах $\lambda \leq r \leq 10\lambda$, а в четвертом $1 \cdot 10^3 \leq r \leq 5 \cdot 10^3$ м.

На рис. 3 показано падение уровня звукового давления в дальнем поле сферического инфразвукового излучателя при начальном уровне звукового давления $p_1 = 160$ дБ в зависимости от расстояния.

Акустические волны затухают в воздушной среде из-за наличия сдвиговой и объемной вязкостей, а также влияния теплопроводности.

Если не учитывать тепловые потери, а также принимать во внимание учет объемной вязкости для высоких частот, то можно предположить, что потери при распространении бегущей волны в реальной среде обусловлены сдвиговой вязкостью. С учетом затухания потенциал звукового поля волны [10] записывается так

$$\varphi = A \cdot e^{\alpha_1 x} \cdot e^{f(\omega t - kx)}, \quad (2)$$

где α_1 - коэффициент определяется по формуле Стокса

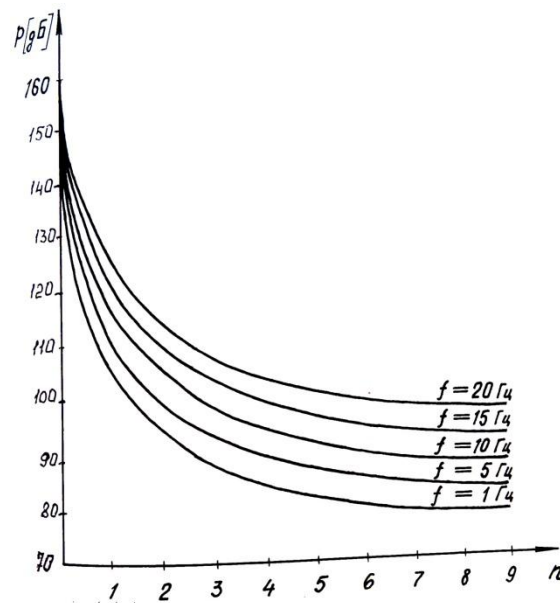


Рис. 3. Падение уровня звукового давления в дальнем поле сферического излучателя

$$\alpha_1 = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho c^2} \cdot \mu, \quad (3)$$

μ – коэффициент сдвиговой вязкости $\left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right]$

$$\mu = 1,721 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot \text{с} \right]. \quad (4)$$

Падение уровня звукового давления имеет следующий вид

$$N_B = 1,715 \cdot 10^7 \cdot \frac{f^2}{\rho c^2} \left[\frac{4}{3} \mu + (\gamma - 1) \frac{\varepsilon}{c_p} \right], \quad (5)$$

где γ – удельный вес воздуха;

ε – коэффициент теплопроводности, $\varepsilon = 2,1 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{г} \cdot \text{град}} \right]$;

c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Для расчета затухания инфразвука в атмосфере в частотном диапазоне от 1 до 30 Гц была составлена программа. В программу внесены в качестве постоянных величин ε , c_p , γ , μ . Рассчитан коэффициент затухания α_1 и величина затухания волны в дБ на километр N_B относительно частоты инфразвука.

На рис. 4 и рис. 5 представлены результаты расчета по затуханию инфразвуковых волн в однородной атмосфере на инфразвуковых частотах (от 1 до 30 Гц).

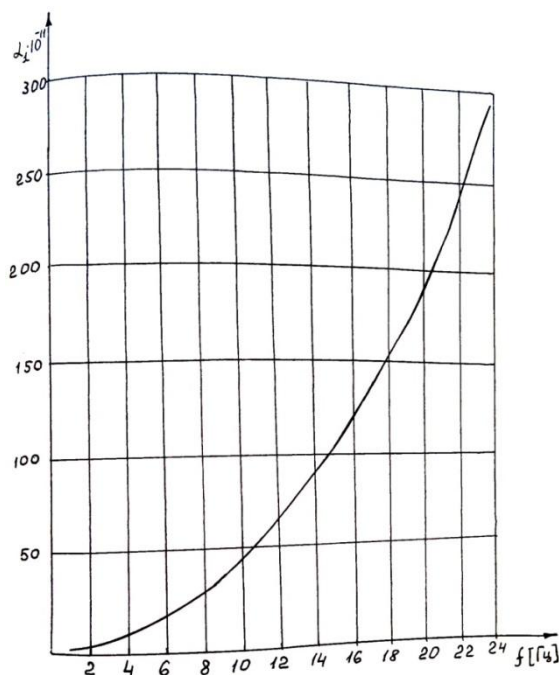


Рис. 4. Кривая изменения коэффициента затухания акустических волн на инфразвуковых частотах в зависимости от частоты

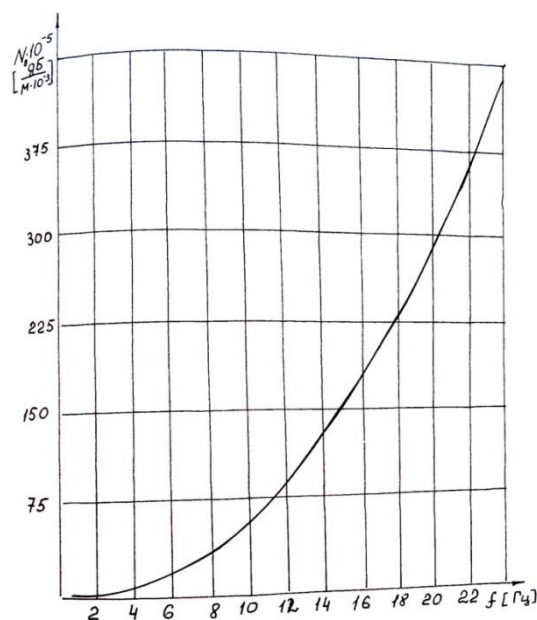


Рис. 5. Изменение падения уровня звукового давления в дБ на км на инфразвуковых частотах в зависимости от частоты

Приведенные расчеты показывают, что при начальном уровне звукового давления рядом с акустическим источником инфразвукового излучения в 160 дБ, мы имеем уровень звукового давления 148 дБ в дальнем поле

при частоте излучения $f = 20$ Гц на расстоянии длины волны от излучающего элемента, а на расстоянии $1 \cdot 10^3$ м от излучателя уровень составляет 130 дБ. В то же время поле сферического излучателя может гарантировать этим уровням на тех же расстояниях 95 дБ и 80 дБ соответственно.

Выводы

Предложена методика исследований взаимодействия факторов космической погоды, природных и техногенных катастроф с организмами ноосферы Земли через моделирование и регистрацию инфразвука.

Разработаны алгоритм и программа для моделирования и расчета характеристик акустических инфразвуковых полей сферического типа. Получено, что при изменении уровня звукового давления в пределах от 80 до 180 дБ активная составляющая акустической мощности инфразвукового сферического излучателя меняется в пределах 0,0012 Вт до $12,2 \cdot 10^3$ кВт. Установлено, что при $r = 5\lambda$ сдвиг фаз между звуковым давлением и колебательной скоростью в дальнем поле можно не учитывать и считать их находящимися в фазе, если параметр близок к единице kR .

Разработаны алгоритм и программа для расчета затухания инфразвука в атмосфере. Результаты проделанного расчета подтверждают, что для случая распространения инфразвуковых волн в воздушной среде учет вязкостного трения можно не производить.

В настоящее время существует большая необходимость создания систем, которые способны объединить в себе космические и наземные наблюдения и смогут четко фиксировать основные климатические переменные в масштабах от региональных до глобальных, а также стабильно работать на протяжении десятилетий для выявления климатических колебаний и трендов.

С помощью современных компьютеров можно проводить расчеты движения инфразвуковых волн в атмосфере и использовать эту информацию для предсказания извержений вулканов.

Список использованной литературы

1. Сокол, Г. І. О ролі інфразвуку у взаємозв'язку погоди з біосферою Землі [Текст] / Г. І. Сокол // Обласний науково-практичний круглий стіл «Формування екологічно-компетентної особливості на засадах випереджаючої освіти для сталого розвитку, присвячений 150-річчю з дня народження В. І. Вернадського», Дніпропетровськ, 20 вересня 2012 р. – С. 1 – 10.
2. Yokoo A. Analysis of pressure waves observed in Sakurajima eruption movies / A. Yokoo, K. Ishihara // Earth Planets Space. 2007. № 59. P. 177-181.

3. *Matoza R. S.* Infrasonic observations of the June 2009 Sarychev Peak eruption, Kuril Islands: Implications for infrasonic monitoring of remote explosive volcanism / R. S. Matoza, A. Le Pichon, P. Herry et al. // *J.V.G.R.* 2012. V. 200. № 1–2. P. 35–47.
4. *Fee D.* An overview of volcano infrasound: From Hawaiian to plinian, local to global / D. Fee, R. S. Matoza // *J.V.G.R.* 2013. № 1. V. 249. P. 123–139.
5. *Johnson J.B., Ripepe M.* Volcano infrasound: A review // *J.V.G.R.* 2011. V. 206. № 3–4. P. 61–69.
6. *Fee D.* Infrasound from Tungurahua volcano 2006–2008: strombolian to plinian eruptive activity / D. Fee, M. Garces, A. Steffke // *J.V.G.R.* 2010. V. 193. № 1–2. P. 67–81.
7. *Сорокин А. Г.* Исследование дальнего распространения инфразвука от взрывов и океанских штормов. Автореферат дисс. ... канд. физ._мат. наук. Иркутск, 1995. 115 с.
8. *Фирстов П. П.* Динамика вулканических извержений и ее проявление в ударно_волновых и акустических эффектах в атмосфере. Автореферат дисс. ... докт. физ._мат. наук. Южно_Сахалинск, 2012. 43 с.
9. *Фирстов П. П.* Система хранения и обработки волновых возмущений в атмосфере от вулканических извержений / П. П. Фирстов, Ю. А. Филиппов // *Вулканология и сейсмология.* 1997. № 2. С. 36–46.
10. *Гринченко, В. Т.* Основы акустики [Текст] / В. Т. Гринченко, И. В. Вовк, В. Т. Маципура – Київ: Наукова думка, 2007. – 640 с.
11. *Шилдт Г.* Java 8. Полное руководство; 9-е изд.: Пер. с англ. - М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2015. - 1376 с.: ил. – Парал. тит. англ.