

АНОТАЦІЯ

Шевелев М. Б. Параметри інфразвукових хвиль, згенерованих джерелами різної фізичної природи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика (Фізико-математичні науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2023.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної проблеми – експериментальному та теоретичному дослідженню впливу інфразвукових хвиль, згенерованих джерелами природного та штучного походження, на параметри атмосферно-космічних радіоканалів, які використовуються засобами телекомунікації, радіолокації, радіонавігації, радіопеленгації, тощо, а також на характеристики радіохвиль.

Метою дисертаційної роботи є дослідження основних фізичних процесів в атмосферно-іоносферних радіоканалах, які супроводжували вплив на навколосемне середовище хвиль інфразвукового діапазону, згенерованих джерелами природного та техногенного походження.

З першого розділу, який є оглядовим, випливає, що більшість джерел інфразвуку як природного, так і штучного походження є локалізованими в часі та просторі. Аналіз збурень параметрів від подібних джерел дозволив з великою ймовірністю виявити інфразвукові коливання на різних моніторингових станціях світу. Наведено дані про спектр технічних засобів, які доцільно використовувати для реєстрації інфразвукових коливань. Описано складнощі, що виникають у процесі реєстрації інфразвукових коливань, і методи їхнього вирішення. Описано основні методи комп'ютерного аналізу інфразвукових сигналів за допомогою спеціального програмного забезпечення й алгоритмів, які розроблено для пакетів комп'ютерної математики. Оцінено основні параметри збурень тиску в

повітрі від різних джерел за даними зарубіжних робіт. Показано, що теоретичне описання поширення інфразвуку в атмосфері потребує застосування відповідних моделей і фізичних спрощень, зокрема – представлення поширення радіохвиль в атмосферно-іоносферних радіоканалах у рамках променевого та хвилеводного наближення. Перше найбільш вдало описує фізичні процеси на відносно невеликих відстанях (до 1 Мм), друге – на більших відстанях (більше 1 Мм).

У другому розділі підтверджено, що число падінь мініастероїдів швидко спадає зі збільшенням їх енергії світіння. Обґрунтовано, що закон розподілу числа падінь космічних тіл метрового розміру за довготою є близьким до рівномірного. Розподіл числа падінь за широтою зменшується при збільшенні широти, що обумовлено не астрономічними, а геометричними причинами. Серед усіх космічних тіл, які потрапляють до атмосфери Землі, сталою є кількість космічних тіл в діапазоні енергій свічення 20 ГДж – 150 ГДж. При збільшенні енергії від 125 ГДж до 3000 ГДж прийнятний степеневий закон розподілу. Швидкість більшості космічних тіл варіювалася в діапазоні приблизно від 12,5 км до 20 км/с, і лише в двох випадках спостерігалось значення швидкості від 45 км/с до 49 км/с. Залежність числа космічних тіл, які вторгаються до атмосфери, від висоти області їхнього максимального свічення добре апроксимується нормальним законом у діапазоні висот 20 км – 48 км. Спостерігається досить високий статистичний зв'язок між квадратом початкової швидкості космічного тіла та логарифмом енергії свічення.

Третій розділ присвячено встановленню залежностей основних параметрів інфразвукових хвиль, згенерованих падінням і вибухом крупних космічних тіл, від відстані. Предприйнято спробу вивести прості математичні співвідношення, засновані на фізично адекватних і зрозумілих механізмах поширення інфразвукових хвиль на глобальні відстані уздовж поверхні Землі.

За результатами дослідження акустичного сигналу від унікального Тунгуського космічного тіла встановлено, що залежність амплітуди інфразвукової хвилі, згенерованої падінням і вибухом Тунгуського космічного тіла, від відстані є складною та з трудом піддається апроксимації простими математичними співвідношеннями, заснованими на фізично розумних механізмах поширення інфразвукових хвиль уздовж поверхні Землі на глобальні відстані. Порівняльний аналіз отриманих апроксимуючих залежностей дозволив з їх сукупності обрати кращі залежності. До них відносяться залежності, засновані на наступних моделях поширення інфразвукових хвиль в хвилеводах, що утворені поверхнею Землі та атмосферними областями (в першу чергу стратосферою та в меншій мірі термосферою): модель зі сферичною розбіжністю з поступовим переходом до циліндричної розбіжності та модель з циліндричною розбіжністю та загасанням.

Проведено статистичний аналіз основних параметрів сигналу (часу затримки, швидкості приходу, тривалості, періоду коливань і амплітуди) в залежності від горизонтальної відстані між областю свічення Індонезійського суперболіду та місцезнаходженням інфразвукової станції. Наведено апроксимуючі залежності параметрів сигналу від відстані. Побудовано кореляційні поля. Оцінено основні параметри метеороїду, скориговане значення швидкості приходу інфразвукового сигналу та середньої швидкості тропосферно-стратосферного вітру.

Для Челябінського космічного тіла показано, що кореляційне поле «швидкість приходу інфразвукового сигналу – відстань між джерелом та станцією» має значний розкид, середнє значення цієї швидкості складає 286.0 ± 21.5 м/с. Отримані апроксимуючі залежності для швидкості приходу інфразвукового сигналу від відстані між джерелом і станцією, а також від азимуту джерела, тривалості та амплітуди сигналу від відстані. Побудовано кореляційне поле для періодів основного коливання, оціненого за двома різними методиками. Час запізнення інфразвукового сигналу збільшувався

практично за лінійним законом при збільшенні відстані між джерелом інфразвуку та станцією. Середня по всіх трасах швидкість приходу інфразвукового сигналу складала 291 м/с. Залежність швидкості приходу від відстані через сильний розкид даних спостережень апроксимовано константою. Залежність швидкості приходу від синусу азимутального кута (розрахованого та оціненого) апроксимована лінійним законом, з якого оцінено середнє по всіх трасах значення швидкості (287 – 288 м/с) та швидкості тропосферно-стратосферного вітру (12 – 14 м/с). Залежність тривалості інфразвукового сигналу від відстані апроксимовано лінійним законом. При цьому тривалість сигналу поблизу джерела складала біля 10.7 хв. У спектрі інфразвукового сигналу на різних станціях переважали складові з періодом приблизно від 17 до 85 с. Середні значення періодів, отримані за допомогою різних методик, змінювались приблизно від 35 до 39 с.

Дослідження акустичних коливань, згенерованих Липецьким метеороїдом, показали, що час запізнення інфразвукового сигналу збільшувався при збільшенні горизонтальної відстані від епіцентру вибуху метеороїду до станцій за лінійним законом. При цьому середня за всіма трасами швидкість приходу сигналу була близькою до 304 – 305 м/с. Швидкість приходу інфразвукового сигналу при збільшенні відстані спочатку достатньо швидко спадала, а на відстанях 4.5 – 8.66 Мм флукутувала біля значення 302 м/с. Залежність тривалості інфразвукового сигналу від відстані була спадаючою за лінійним законом. Дисперсійне уширення сигналу було несуттєвим на відстанях 5 – 8 Мм. Середні значення періодів інфразвукового сигналу, які не залежать від відстані та які оцінено за різними регресіями, дорівнювали 6.28 ± 0.98 та 6.14 ± 0.76 с. Середнє значення початкової кінетичної енергії метеороїду, отримане з інфразвукових спостережень періода коливань, складає 2.26 – 2.43 кт ТНТ, що несуттєво відрізняється від незалежних даних НАСА (2.8 кт ТНТ). Апроксимація швидкості приходу інфразвукового сигналу від синуса азимутального кута показала, що скориговане значення швидкості приходу сигналу складало біля

300 м/с, а середнє значення тропосферно-стратосферного вітру було близьким до 25 – 31 м/с. Аналіз кореляційних полів показав, що існує стійкий статистичний зв'язок між спостережуваним та істинним азимутами джерела інфразвуку. Відмічено, що мала місце тенденція до збільшення рівня флуктуацій азимуту при збільшенні відстані.

Для параметрів інфразвукового сигналу, згенерованого Камчатським космічним тілом, встановлено наступне. Амплітуда інфразвукового сигналу досить швидко спадала при збільшенні відстані від місця вибуху метеороїду до місця реєстрації сигналу. Час запізнення інфразвукового сигналу збільшувався в міру збільшення відстані між місцем вибуху космічного тіла та місцем реєстрації сигналу. Швидкість приходу сигналу залежала від вказаної відстані й орієнтації траси та змінювалася в межах 269 – 308 м/с. Тривалість інфразвукового сигналу практично не залежала від відстані між місцем генерації та місцем реєстрації сигналу. Спектри інфразвукового сигналу були широкосмуговими, в них були присутні періоди від ~5 до ~40 с. Разом з тим найбільша енергія припадала на виділені періоди 12 – 15 і 28 – 33 с. Побудовано кореляційні поля та регресії для основних параметрів інфразвуку. За переважним періодом інфразвуку оцінено кінетичну енергію (179 кт ТНТ) та акустичну ефективність (~4%) космічного тіла.

У четвертому розділі продемонстровано приклади залежностей амплітуди хвилі інфразвукового діапазону, згенерованої потужним вулканом і зареєстрованої станціями світової мережі на різних континентах світу, від відстані між станцією та джерелом. Установлено, що найбільш вдалою є апроксимація, яка описує хвилеводне поширення із загасанням. Оцінено відповідні коефіцієнти та глибину загасання.

Вперше на прикладі масових вибухів складів боєприпасів у Вінницькій області у п'ятому розділі показано, що при збільшенні енерговиділення від 3 до 53 т ТНТ спостерігалася тенденція до збільшення амплітуди та періоду переважаючого коливання. Тривалість цугів коливань при цьому збільшувалася від ~1.5 до 2 хв. Встановлено, що при невеликій (на 15 – 18%)

зміні відстані між епіцентром вибухів і місцем розташування інфразвукової станції параметри інфразвукового сигналу змінювалися незначно. Відмінності в хвильових формах пов'язані з орієнтацією траси. Виявлено, що при енерговиділенні, що дорівнює 53 т ТНТ, в спектрі коливань переважали гармоніки з періодом від 3 до 5 – 6 с. Тривалість цугів коливань з такими періодами становила 40 с. Розраховано, що середня швидкість приходу для різних трас при стратосферного відображенні хвиль змінювалася в межах 300 – 309 м/с, що свідчить про вплив вітру у верхній атмосфері на поширення інфразвуку. При термосферному відбитті хвиль амплітуда сигналу була в кілька разів менше, а швидкість приходу становила 245 – 250 м/с.

На прикладі серій масових вибухів поблизу м. Ічня вивчено особливості хвильових форм інфразвукових сигналів, їх амплітуд і спектрального складу при далекому (218 км) поширенні хвиль, згенерованих впродовж техногенної катастрофи на арсеналі боєприпасів. Показано, що при збільшенні енерговиділення від 4.1 до 49.9 тон ТНТ спостерігалася тенденція до збільшення амплітуди та періоду переважаючого коливання. Тривалість цугів коливання при цьому збільшувалася від 2.5 до 7 с. Виявлено, що при енерговиділенні, рівному 49.9 тон ТНТ, в спектрі коливань переважали гармоніки з періодами від 1 до 2 с. Розраховано, що середня швидкість приходу хвиль змінювалася в межах 300 – 333 м/с. Побудовано основні кореляційні поля.

У шостому розділі на прикладі сильної геокосмічної бурі вивчено особливості хвильових форм геомагнітних компонент на різних станціях світової мережі *InterMagnet*. Показано, що зі зменшенням широти амплітуда варіацій X- і Y-компонент спадає. Основні періоди, які спостерігалися в спектрі коливань, складали 35 хв – 55 хв та 70 хв – 110 хв. Амплітуда коливань змінювалася приблизно в 70 разів. Тривалість квазіперіодичних коливань варіювалася в діапазоні 2–16 годин.

У сьомому розділі вперше на прикладі помірного землетрусу в Албанії продемонстровано, що подібні джерела можуть викликати квазіперіодичні

варіації рівня геомагнітного поля, які мають час запізнення близько 6 хв і тривалість 70–80 хв. Переносником збурень в цьому випадку могли бути магнітогідродинамічні хвилі. Квазіперіодичні збурення, які мають час запізнення 97–106 хв і тривалість близько 130–140 хв, швидше за все, викликані землетрусом. За перенесення збурень відповідали акустико-гравітаційні хвилі, які мають період 7–14 хв. Відносне збурення концентрації електронів у полі акустико-гравітаційної хвилі було близько 5.3%. Результати спостережень за албанським і турецьким землетрусами в цілому узгоджуються між собою.

Ключові слова: хвиля, іоносфера, вітер, хвилевід, статистичний аналіз, падіння метеороїдів, землетрус, апроксимація, амплітуда тиску, надширокосмуговий сигнал, сферична та циліндрична розбіжність, дисперсія, фазова швидкість, загасання.

ABSTRACT

Shevelev M. B. Parameters of infrasound waves generated by sources of different physical origin. – Qualifying scientific work is as a manuscript.

Thesis for a Philosophy Doctor Degree in Physics and Mathematics: Speciality 01.04.03– Radio Physics (Physics and Mathematics). – V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

This Ph.D. thesis is devoted to the solution of an urgency task: this is experimental and theoretical research of the infrasound waves action generated by sources of natural and artificial origin, on the parameters of atmospheric and space radio channels used by means of telecommunications, radar, radio navigation, radio direction finding, etc., as well as on the characteristics of radio waves.

The goal of this thesis is to study the main physical processes in the atmospheric and ionospheric radio channels during the impact on the near-Earth environment of infrasound waves generated by sources of natural and anthropogenic origin.

From the Chapter I (analytical review of Ph.D. thesis), it follows that most sources of infrasound, both natural and artificial, are localized in time and space. The analysis of parameter disturbances from similar sources made it possible to detect low-frequency (LF) oscillations at various monitoring stations around the world. The data on the range of technical equipment, which are effective to use for recording LF oscillations, are given. Difficulties arising in the process of recording infrasound vibrations and methods of their solution are described. Basic methods of computer analysis of infrasound signals using special software and algorithms developed for computer mathematics packages are described. The main parameters of air pressure disturbances from various sources were estimated based on the data of foreign works. It is shown that the theoretical description of the propagation of infrasound in the atmosphere requires the use of appropriate models and physical

simplifications, in particular, the representation of the propagation of radio waves in atmospheric-ionospheric radio channels within the framework of the ray and waveguide approximation. The first most successfully describes physical processes at relatively small distances (up to 1 Mm), when the second approximation is rational for longer distances (more than 1 Mm).

At the Chapter II a rapid decrease in the number of asteroids with increasing of their glow energy is confirmed. It is substantiated that the law of distribution of the number of falls of meter-size bolides by longitude is close to uniform. The distribution of the number of falls by latitude decreases with increasing latitude, which is due not to astronomical reasons, but to geometric reasons. Among all bolides that enter the Earth's atmosphere, the number of cosmic bodies in the range of luminescence energies from 20 GJ to 150 GJ is constant. When increasing the energy from 125 GJ to 3000 GJ, a power-law distribution is acceptable. The speed of most of the space bodies varied in the range of approximately from 12.5 km to 20 km/s, and only two cases were observed with a speed value from 45 km/s to 49 km/s. The dependence of the number of cosmic bodies invading the atmosphere on the height of the region of their maximum luminosity is well approximated by the normal law in the (20–48) km height range. A fairly high statistical relationship is observed between the square of the initial speed of the cosmic body and the logarithm of the luminous energy.

The Chapter III is devoted to establishing the dependence of the main parameters of infrasound waves from the fall and explosion of large celestial bodies versus distance. An assume was made to derive simple mathematical relations based on physically adequate and understandable mechanisms of propagation of infrasound waves over global distances along the Earth's surface.

It is found out from infrasonic signal analysis of unique Tunguska celestial body the following conclusions have been drawn from this study: (1) the dependence of the amplitude of the infrasound wave generated by the Tunguska celestial body on distance is determined to be complex and difficult to fit with simple mathematical relations based on reasonable physical models of the

propagation of infrasound waves along the Earth's surface at global-scale distances, (2) the intercomparison of the approximating relations determined permitted the selection of preferable relations from their entire set. To these latter belong the relations based on the following models for propagation of infrasound waves in the waveguides formed by the ground and atmospheric layers (primarily, by the stratosphere, and, to a lesser degree, by the thermosphere): (1) a spherical wavefront gradually becoming a cylindrical wavefront, and (2) a cylindrical wavefront with attenuation.

The statistical analysis of the basic signal parameters (time delay, celerity, duration, oscillation period, and amplitude) has been performed as a function of the horizontal distance from the luminosity region of the Indonesian super-bolide to the place of a corresponding infrasound station. The approximating relations for the signal parameters as a function of range are presented. Correlation diagrams are constructed. The principal meteoroid parameters, the corrected infrasound wave celerity, and the mean troposphere-stratosphere wind speed are estimated.

For Chelyabinsk meteoroid it is found the correlation diagrams for the infrasound signal celerity and the distance between the source and an observation station have been shown to exhibit a significant scatter with a mean of 286.0 ± 21.5 m/s. The model fits of the infrasound signal celerity to the signal duration, to the back-azimuth angle of arrival, and to the distance between the source and an observation station, as well as the model fit of the signal amplitude to distance, are determined. The correlation diagrams for the main oscillation periods obtained by two different techniques are constructed. The infrasound signal time delay increases virtually linearly with the distance between the infrasound source and the station. The infrasound signal celerity averaged over all paths is equal to 291 m s^{-1} . The dependence of the celerity on the distance is fit with a constant due to a large scatter of the data. The dependence of the celerity on the sine of the back-azimuth angle of arrival, both calculated and estimated, is fit with a straight line that gives mean values of the celerity ($287 - 288 \text{ m s}^{-1}$) and troposphere-stratosphere winds ($12 - 14 \text{ m s}^{-1}$) along all paths. The dependence of the infrasound signal duration

on the distance is fit with a straight line, and the signal duration near the source is found to be 10.7 min. The spectral components with a period in the 17-s to 85-s range predominate in the infrasound signal spectrum, and the period mean values estimated by employing different techniques vary from 35 s to 39 s.

Acoustic oscillations investigation, which generated by Lipetsk meteoroid, shown the infrasonic signal exhibits a linear dependence of the infrasonic signal time delay on the horizontal distance from the meteoroid explosion epicenter, and the signal celerity averaged over all propagation paths is estimated to be approximately 304 – 305 m/s. The infrasonic signal celerity first shows a rapid enough decrease with distance, but over the 4.5 – 8.66-Mm distance range exhibits fluctuations about the 302 m/s value. The duration of the infrasonic signal shows a linear decrease with distance, and the signal duration dispersion is insignificant in the 5 – 8 Mm distance range. The mean periods of the infrasonic signal, independent of distance and averaged over various regression functions, are estimated to be 6.28 ± 0.98 s and 6.14 ± 0.76 s. The mean of the initial kinetic energy estimated using the oscillation period of the infrasonic signal is 2.26 – 2.43 kt TNT, which differs insignificantly from the NASA estimates (2.8 kt TNT). The approximation for the dependence of celerity vs. sine of the back-azimuth angle of arrival shows that the corrected value of the celerity is about 300 m/s, and the mean of the troposphere-stratosphere wind is approximately 25 – 31 m/s. Analysis of the scatter diagrams has shown that a steady statistical link exists between the true and observed back-azimuth angles of infrasound sources. It is noted that the level of fluctuations in the azimuth tends to increase with distance.

For Kamchatka meteoroid infrasonic signal it was found that the infrasonic signal amplitude exhibits quite a rapid decrease with distance between an infrasonic station and the meteoroid's explosion site. The time delay of the infrasonic signal shows an increase with distance between the celestial body explosion and the site of signal detection. The signal celerity exhibits a dependence on the distance and the path orientation; it is estimated to be in the range of 269–308 m/s. The infrasonic signal duration shows virtually no dependence on the

distance from the detonation point to an infrasonic station. The infrasonic signal spectra have a wide bandwidth with periods from ~ 5 to ~ 40 s. At the same time, the greatest energy falls within the isolated periods of 12–15 s and 28–33 s. The scatter diagrams and regressions for the infrasound main parameters were plotted. The celestial body's kinetic energy (179 kt TNT) and acoustic efficiency ($\sim 4\%$) were estimated from the prevailing infrasonic period.

In the Chapter IV, examples of dependences of the amplitude of the infrasound wave generated by a powerful volcano and registered by stations of the global network on different continents of the world, on the distance between the station and the source are demonstrated. It was established that the most successful approximation is the one that describes waveguide propagation with attenuation. The corresponding coefficients and attenuation depth were estimated.

At Chapter V (on the example of massive ammunition depot at Vinnytsia region) it was shown that an upward trend in the amplitude and period of the predominant oscillation were observed when the energy release increased from 3 to 53 tons of TNT, while the duration of the oscillation trains increased from ~ 1.5 to 2 min. The infrasonic signal parameters were determined to change insignificantly when the distance between the explosion epicenter and an infrasonic station location changed a little (by 15 to 18 %). The differences in the wave forms are related to orientation of the propagation path. The analysis has revealed that the harmonics in the 3 to 5 – 6 s period range were predominant when the energy release was equal to 53 tons of TNT. The duration of the trains of oscillations with such periods amounted to 40 s. The average celerity was calculated to change within 300 to 309 m/s for different propagation paths with stratospheric wave reflections, that provides evidence for the influence of the wind in the upper atmosphere on the infrasound propagation. The thermospheric reflection resulted in the signal amplitude smaller by a factor of a few times and the celerity equal from 245 to 250 m/s.

At the Ichnia ammunition depot catastrophe the features of the waveforms, amplitudes, and spectral content of the infrasonic signals generated during the

man-made catastrophe and propagated to long distances (218 km) from the ammunition depot near the Town of Ichnia (Chernihiv Province, Ukraine) on October 9 – 10, 2018 have been investigated. It has been shown that an upward trend in the amplitude and period of the predominant oscillation are observed when the energy release increases from 4.1 to 49.9 tons of TNT. The duration of the oscillation trains increases from 2.5 to 7 s. The analysis has revealed that the harmonics in the 1 to 2-s period range are predominant when the energy release was equal to 49.9 tons of TNT. The average celerity of waves is calculated to vary within the 300 to 333 m/s interval. The main correlation fields are plotted.

At the Chapter VI, using the example of a strong geospace storm, the peculiarities of the geomagnetic components waveforms at various stations of the *InterMagnet* global network were studied. It is shown that as the latitude decreases, the amplitude of the *X*- and *Y*-component variations decreases. The main periods observed in the spectrum of oscillations reached from 35 min to 55 min and from 70 min to 110 min. The amplitude of oscillations changed approximately 70 times. The duration of quasi-periodic oscillations varied in the (2–16) hours range.

At the Chapter VII for the Albanian moderate earthquake it is demonstrated similar sources can cause of the quasi-periodic variations in the level of the geomagnetic field which observed with a 6 min lag and a 70–80 min duration. These disturbances could be transferred by the magnetohydrodynamic waves. The quasi-periodic variations that were observed to appear with a 97–106 min lag and to last for about 130–140 min were most likely due to the earthquake. They were transferred by the atmospheric gravity waves with a period of 7–14 min. A relative disturbance in the electron density in the atmospheric gravity wave field was observed to be approximately 5.3%. The results obtained from observations of Albanian and Turkish earthquakes show agreement.

Keywords: wave, ionosphere, wind, waveguide, statistic analysis, meteoroids fall, earthquake, approximation, pressure amplitude, ultra-wideband signal, spherical and cylindrical wavefront, dispersion, phase velocity, attenuation.