



# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

## SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ НАУК  
УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ  
КОСМІЧНЕ  
АГЕНТСТВО  
УКРАЇНИ

Том 23  
3(105)  
2017

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ • ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. • ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ НА РІК • КИЇВ

### ЗМІСТ

#### Космічна й атмосферна фізика

- Метельська Н. С., Кабашников В. П., Норко А. В., Чайковський А. П., Бриль А. І., Мілінєвський Г. П., Данилевський В. О. Моделювання вмісту аерозолю в атмосфері за допомогою моделі Geos-Chem для валідації космічного проекту «Аерозоль-UA» ..... 3

- Федоренко Ю. П. Возбуждение наземных геомагнитных пульсаций PC5 акустико-гравитационными волнами..... 11

#### Дослідження Землі з космосу

- Ткаченко А. І. Второе приближение полетной геометрической калибровки ..... 38

#### Астрономія й астрофізика

- Казанцев А. М., Казанцева Л. В. Негравітаційний ефект та орієнтація осей обертання кілометрових астероїдів головного поясу ..... 42

- Бейкер Р. М. Л. Дослідження високочастотних гравітаційних хвиль та їхнє використання для вивчення екзопланет.. 47

- Яцків Я. С., Вавилова І. Б., Романець О. А., Савчук В. С. Маловідомі факти і події з історії досліджень гравітаційних хвиль в Україні..... 64

### CONTENTS

#### Space and Atmospheric Physics

- Miatselskaya N. S., Kabashnikov V. P., Norko H. V., Chaikovsky A. P., Bril A. I., Milinevsky G. P., Danylevsky V. O. Atmosphere aerosol modeling by Geos-Chem for the Aerosol-UA space project validation ..... 3

- Fedorenko Yu. P. Excitation of ground-based geomagnetic pulsations PC5 by acoustic gravity waves ..... 11

#### Study of the Earth from Space

- Tkachenko A. I. The second approximation of the in-flight geometric calibration..... 38

#### Astronomy and Astrophysics

- Kazantsev A. M., Kazantseva L. V. A non-gravitational effect and spin orientation of kilometer-sized asteroids of the main belt ..... 42

- Baker R. M. L., Jr. High-frequency gravitational wave research and application to exoplanet studies ..... 47

- Yatskiv Ya. S., Vavilova I. B., Romanets O. A., Savchuk V. S. Some little-known facts and events from the history of gravitational wave research in Ukraine ..... 64

<i>Василенко А. А. Космічні місії найближчого майбутнього: внутрішня область Сонячної системи</i> .....	<b>73</b>	<i>Vasylенко А. А. Future space missions: the inner region of the Solar system.....</i>	<b>73</b>
<b>Соціогуманітарні аспекти космічних досліджень</b>		<b>Social Sciences in Space Exploration</b>	
<i>Синявський І. І. 11-й Міжнародний симпозіум «Малі супутники для спостережень Землі».....</i>	<b>81</b>	<i>Syniavskyi I. I. 11th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation .....</i>	<b>81</b>
<b>Нова книга</b>		<b>New Book</b>	
<i>Кифоренко Б. Н. Сингулярные оптимальные управления в механике космического полета.....</i>	<b>82</b>	<i>Kiforenko B. N. Singular optimal controls in the mechanics of space flight .....</i>	<b>82</b>
<b>Наши авторы</b> .....	<b>85</b>	<b>Our authors</b> .....	<b>85</b>

На першій сторінці обкладинки — Фрагмент часового цугу акусто-гравітаційних хвиль  
(див. статтю Ю. П. Федоренка)

**Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку  
наукових фахових видань України, в яких публікуються результати дисертаційних робіт  
на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних та технічних наук**

*У підготовці видання взяло участь Українське регіональне  
відділення Міжнародної академії астронавтики*

**Відповідальний секретар редакції О. В. КЛИМЕНКО**

Адреса редакції: 01030, Київ-30, вул. Володимирська, 54,  
тел./факс (044) 526-47-63, ел. пошта: reda@mao.kiev.ua  
Веб-сайт: space-scitechnjournal.org.ua

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

---

Підписано до друку 10.11.2017. Формат 84×108/16. Гарн. Ньютон. Ум. друк. арк. 9,03. Обл.-вид. арк. 9,48.  
Тираж 100 прим. Зам. № 5074.

Оригінал-макет виготовлено і тираж віддруковано ВД «Академперіодика» НАН України  
вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01004

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.03.003>

UDC 551.510.42

N. S. Miatselskaya<sup>1</sup>, V. P. Kabashnikov<sup>1</sup>, A. V. Norko<sup>1</sup>,  
A. P. Chaikovsky<sup>1</sup>, A. I. Bril<sup>1</sup>, G. P. Milinevsky<sup>2,3,4</sup>, V. O. Danylevsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>2</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup> Jilin University, International Center of Future Sciences, Changchun, China

## ATMOSPHERE AEROSOL MODELING BY GEOS-CHEM FOR THE AEROSOL-UA SPACE PROJECT VALIDATION

We used a global chemical transport model GEOS-Chem to compute monthly mean fine, coarse, and total aerosol volume concentration for Minsk and Kyiv in the period from 2010 to 2015. We compared results of the model simulation with sun-photometer observations at the ground-based AERONET network sites. We obtained that the aerosol volume concentrations retrieved from observations are in reasonably good agreement with model-simulated ones. However, the agreement is not good enough for the validation of the satellite measurements in the future space mission Aerosol-UA by the GEOS-Chem model simulation. To improve the accuracy of estimating the spatial-temporal distribution of the aerosol volume concentration we decided to apply the optimal interpolation method for assimilating AERONET data in GEOS-Chem model. The temporal correlation function for fine aerosol volume concentration is obtained on the basis of measurements at AERONET Minsk site over the 2002–2015 period and Kyiv site over the 2008–2015 period. We describe the analyzed values of fine aerosol volume concentration at all temporal grid points over the period of 2002 to 2015 for Minsk site and of 2008 to 2015 for Kyiv site, which were determined on the basis of the optimal interpolation method. We propose to use the optimal averaging method for AERONET data on the basis of the temporal optimization interpolation method.

**Keywords:** aerosol, chemical transport GEOS-Chem, model, data assimilation, sun photometer.

### INTRODUCTION

Aerosols are an important component in the Earth's atmosphere. Aerosols cause atmospheric pollution which influence negatively on human health. They affect the radiation balance of the atmosphere, resulting in climate change.

Aerosol distribution in the Earth's atmosphere is studied using measurements from many satellite and ground-based instruments. However, the distribu-

tion and properties of atmospheric aerosols are still not sufficiently known because of high spatial and temporal variability of aerosol concentration, sources, and types. To fill a gap, several aerosol space missions are planned [1], and one of them is the Ukrainian project Aerosol-UA [1, 2]. The main objectives of the project are: to monitor the spatial distribution of key characteristics of terrestrial tropospheric and stratospheric aerosols; to provide a comprehensive observational database enabling accurate quantitative estimates of the aerosol contribution to the energy budget of the climate system; quantify the contribution of anthropogenic aerosols to climate and

---

© N. S. MIATSELSKAYA, V. P. KABASHNIKOV,  
A. V. NORKO, A. P. CHAIKOVSKY, A. I. BRIL,  
G. P. MILINEVSKY, V. O. DANYLEVSKY, 2017

ecological processes [1]. The measurements of the intensity and polarization of sunlight scattered by the atmosphere and the Earth's surface are planned to be obtained by using a multi-channel scanning polarimeter ScanPol and wide-angle multispectral imager-polarimeter MSIP [2].

Data retrieved from the ScanPol and MSIP space-borne polarimeters measurement are planned to be validated using the methods applied in space born missions [3–5]. One of the methods is use correlative ground-based and satellite data sets (see ex. [4]). The instruments of Aerosol-UA mission will be validated by comparing satellite data with ground-based sun/sky photometer observations from AERONET sites (AErosol RObotic NETwork, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>, [6–9]). The network consists of about 800 sites located throughout the world. The AERONET inversion algorithm [10] provides information on aerosol properties integrated over the atmospheric column.

However, ground-based observations represent specific point measurements and have limited spatial coverage. Sun photometer measurements are restricted to day-time and cloud-free conditions. Model simulations can be applied to obtain information on aerosol concentration and composition with complete spatial and temporal coverage [11, 12]. The model must provide consistent information for satellite measurements validation.

## COMPARISON OF THE MODEL SIMULATION WITH AERONET DATA

One of the widely used global chemical transport models is GEOS-Chem (see <http://acmg.seas.harvard.edu/geos>, [13]). GEOS-Chem is a global 3-D chemical transport model driven by assimilated meteorological data from the Goddard Earth Observing System at the NASA Global Modeling Assimilation Office (<http://gmao.gsfc.nasa.gov>). Meteorological input includes winds, temperature, humidity, convective mass fluxes, cloud properties, surface properties, precipitation, mixed layer depth and other fields. The model uses inventories for fossil fuel, biomass burning, biofuel burning, biogenic, and aerosol emissions. The GEOS-Chem model provides spatial and temporal distribution of atmospheric species concentrations including major aerosol types such as sul-

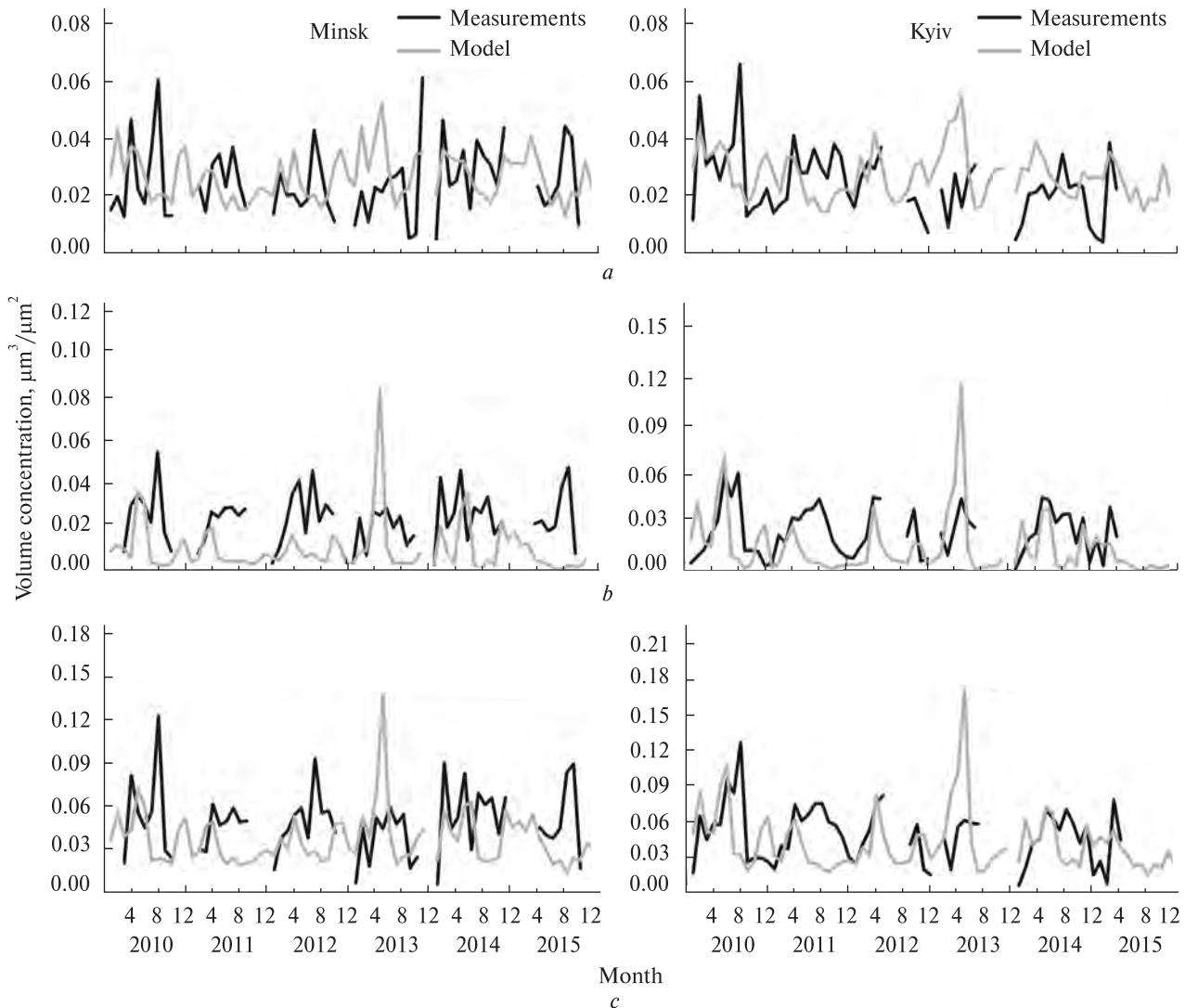
phate, nitrate, ammonium, elemental (black) carbon, organic aerosol, mineral dust, and sea salt.

We compare aerosol volume concentration from the model simulation with observations from AERONET sites for the 2010–2015 period. Volume concentration in  $\mu\text{m}^3\mu\text{m}^{-2}$  is defined as a total volume of aerosol particles in the atmospheric column divided by the surface area of the atmospheric column cross section. AERONET website (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) represents the fine mode VolCon-F (particles radius ranges from 0.05 to 0.6  $\mu\text{m}$ ), coarse mode VolCon-C (radius ranges from 0.6 to 15  $\mu\text{m}$ ), and total VolCon-T aerosol volume concentrations along with other retrieval products.

To calculate the volume concentration we use the NOx-Ox-hydrocarbon-aerosol GEOS-Chem simulation at  $4^\circ \times 5^\circ$  horizontal resolution with 47 vertical levels up to 80 km of altitude with GEOS-5 meteorology. The volume concentration of fine mode aerosols is calculated as the sum of the fine mode particles volume concentrations including sulfates, nitrates, ammonium, mineral dust with the effective radius of particles less than 1  $\mu\text{m}$ , inorganic carbon, organic aerosol, and sea salt with the effective particle radius  $<0.5 \mu\text{m}$ . The volume concentration of coarse mode aerosols is calculated as the sum of the aerosol coarse particles volume concentrations including mineral dust with the effective particle radius  $>1 \mu\text{m}$ , and sea salt with the effective particle radius  $>0.5 \mu\text{m}$ . The hygroscopic growth of the hydrophilic particles is taken into account. Hygroscopic growth factor at ambient relative humidity for each aerosol type is provided by the GEOS-Chem simulation. The dry particles density for different aerosol types is taken from [14].

The comparison of the monthly mean fine, coarse and total aerosol volume concentrations measured by sun photometers and simulated by the GEOS-Chem model is shown in Fig. 1 for Minsk and for Kyiv.

The model captures the magnitude and seasonal cycle of the monthly mean fine, coarse and total aerosol volume concentrations. However, the agreement between model results and measurements is not good enough. For example, for the fine aerosols over Minsk, some of the individual discrepancies can reach 0.03–0.04  $\mu\text{m}^3\mu\text{m}^{-2}$  while the mean measured volume concentration is  $0.025 \mu\text{m}^3\mu\text{m}^{-2}$  with standard deviation  $0.013 \mu\text{m}^3\mu\text{m}^{-2}$ , and the mean modeled volume con-



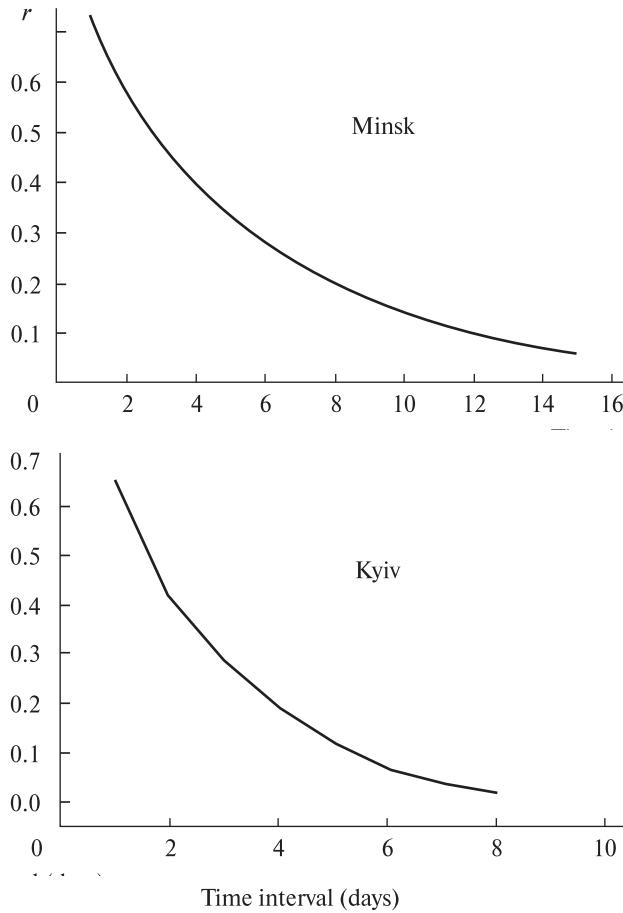
**Fig. 1.** Monthly mean aerosol volume concentrations measured by sun photometer at Minsk and Kyiv AERONET sites and simulated by the GEOS-Chem model: *a* — fine mode, *b* — coarse mode, *c* — total aerosol

centration is  $0.027 \mu\text{m}^3\mu\text{m}^{-2}$  with standard deviation  $0.008 \mu\text{m}^3\mu\text{m}^{-2}$ . Therefore, the data simulated by the GEOS-Chem model can be hardly used directly for AEROSOL-UA validation. To improve the fidelity of the GEOS-Chem aerosol simulation, the data assimilation methods can be applied.

We plan to use an optimal interpolation technique for AERONET data assimilation to obtain the most likely true estimate of the spatial and temporal distribution of aerosol volume concentration.

#### DATA ASSIMILATION PROCEDURE

Data assimilation techniques combine observational data with a background field often consisting of a model forecast in order to produce accurate analyses of the state of the system. The optimal interpolation approach for data assimilation was initially developed for meteorological applications [15, 16], and was later applied to air pollution study [17].



**Fig. 2.** Time interval dependence of the observation minus background correlation: *a* — for Minsk site, *b* — for Kyiv site

In the optimal interpolation scheme, an analysed state is related to the forecast state by the equation:

$$x^a = xB + K(y - H(x^b)), \quad (1)$$

where:  $x^a$  is a vector containing estimated values at regular grid points,  $x^b$  is a vector containing values of a first guess at regular grid points (background),  $y$  is a vector containing values of observations at the observational points,  $K$  is a matrix containing weight coefficients,  $H$  is an observation operator (a function from background state space to observation space).

The first guess (background) is based on some *a priori* information, such as previous analysis, or results of the modeling. Weight coefficients are chosen to minimize the mean-square error in the estimate:

$$K = G H^T (H G H^T)^{-1}, \quad (2)$$

where  $G$  is a covariance matrix of deviations of observations from first guess values at the observational points. Weight coefficients can be expressed in terms of errors:

$$K = P^b H^T (H P^b H^T + R)^{-1}, \quad (3)$$

where  $P^b$  is a covariance matrix of background errors,  $R$  is a covariance matrix of observation errors. A covariance matrix of analysis errors  $P^a$  can be calculated as

$$P^a = (I - KH)P^b, \quad (4)$$

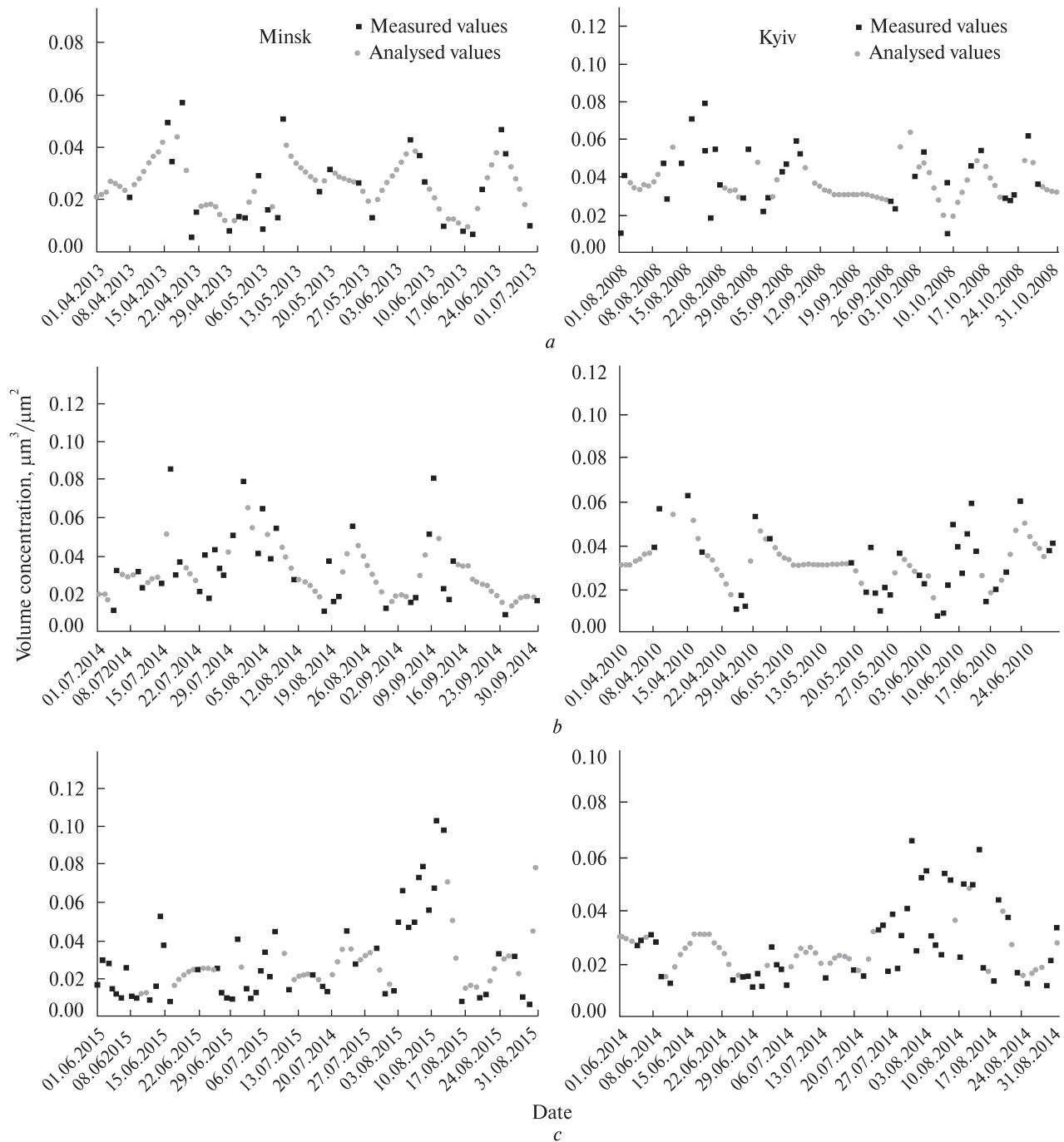
where  $I$  is an identity matrix.

### APPLICATION OF OPTIMAL INTERPOLATION TO AERONET DATA

The AERONET sun photometers provide data on aerosol volume concentration only under restrictive observing cloud-free conditions. Therefore, even at the site location, the observations are presented as data series corresponded to cloud-free days, with lack of data at cloudy periods. To fill this gap, we use the temporal optimal interpolation method. We implement the method to data observed at Minsk and Kyiv AERONET sites.

The AERONET data are divided into three quality levels: Level 1.0 for unscreened raw data, Level 1.5 for cloud-screened data, and Level 2.0 for cloud-screened and quality assured data [7, 18]. For calculations we use Level 2.0 data, nevertheless some measured values of the volume concentration look too high mainly due to influence of cloudy condition. We have eliminated the volume concentration values measured at three cases: 10.09.2002 at 7:09:04, 13.09.2002 at 12:08:01, and 30.04.2006 at 04:27:56. Observations always contain some errors; however, we assume here that the measurement data are free of uncertainties.

The covariance matrix  $G$  is defined by a correlation function. We assume that correlations between temporal grid points depend on the length of time interval only and do not depend on time itself. In this case the single correlation function can be estimated from observational data with the temporal correlation length adjusted empirically. Observational data of fine aerosol volume concentration at Minsk site over the period of 2002 to 2015 and at Kyiv site over the period 2008–2015 provide statistical informa-



**Fig. 3.** Results of implementation of optimal interpolation for the fine aerosol volume concentration at Minsk site: *a* — April—June 2013, *b* — July—September 2014, *c* — June—August 2015, and Kyiv site: *a* — August—October 2008, *b* — April—June 2010, *c* — June—August 2014

tion that we use to obtain correlation function. We define background as the mean volume concentration averaged over 2002–2016 for Minsk site and 2008–2015 for Kyiv site, assuming stationarity. Fig. 2 shows the normalized, smoothed time interval dependence of the observation minus background correlation with the correlation interval 14 days for Minsk site and 8 days for Kyiv AERONET sites.

However, the weight matrix is not time invariant, because the observation points are distributed unevenly in time, so we have to calculate a new weight coefficients for every grid point. We restrict the observations used for each grid point to those observations which are within the correlation interval. Once weight coefficients have been calculated, the analyzed value of volume concentration at the grid point may be determined from (1).

Fig. 3 shows example of the implementation results of optimal interpolation for the fine aerosol volume concentration at Minsk and Kyiv sites in several periods of observation.

An optimal averaging method for AERONET data can be proposed on the basis of the temporal optimal interpolation method. Monthly mean AERONET data are often used for comparisons with results of satellite observations and model simulations. In AERONET, monthly mean is computed using the daily averages available in the month [18]. This averaging scheme implies that when observations are not available in some day, the volume concentration in this day is taken equal to monthly mean values computed from the available daily averages. It is obvious that this assumption is not optimal. We propose to use optimal interpolation method to calculate values of volume concentration in the days when observations are not available, and use the calculated values to obtain monthly mean.

## CONCLUSIONS

Comparison of the aerosol volume concentrations simulated by chemical transport model GEOS-Chem and data retrieved from observations at AERONET sites shows that the model captures the magnitude and seasonal cycle of the monthly mean fine, coarse and total aerosol burden. However, the agreement between model results and measurements is not good enough for direct use of the model data for aerosol

satellite measurements validation in the future Ukraine space project Aerosol-UA. To improve the fidelity of the aerosol simulation, an optimal interpolation method can be proposed for AERONET data assimilation in GEOS-Chem model. Implementation of the optimal interpolation method makes it possible to estimate the values of the aerosol volume concentration when measurements are not available. An optimal averaging method for AERONET data can be proposed on the basis of the temporal optimal interpolation method.

*We acknowledge support by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project X16K-042) and by the Ukrainian State Fund for Fundamental Research (grant F73/36-2017). The work was partly supported by the Special Complex Program for Space Research 2012–2017 of the National Academy of Sciences of Ukraine, and by the projects 16BF051-02 and 16BF023-01 of the Taras Shevchenko National University of Kyiv.*

## REFERENCES

1. Milinevsky G., Yatskiv Ya., Degtyaryov O., et al. Remote sensing of aerosol in the terrestrial atmosphere from space: new missions. *Advs in Astron. and Space Phys.*, **5**, 11–16 (2015).
2. Milinevsky G., Yatskiv Ya., Degtyaryov O., et al. New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere. *Acta Astronautica*, **123**, 292–300 (2016).
3. Sica R. J., Izawa M. R. M., Walker K. A., et al. Validation of the Atmospheric Chemistry Experiment (ACE) version 2.2 temperature using ground-based and space-borne measurements. *Atmospheric Chemistry and Phys.*, **8**, 35–62 (2008).
4. Ionov D. V., Timofeyev Y. M., Sinyakov V. P., et al. Ground-based validation of EOS-Aura OMI NO<sub>2</sub> vertical column data in the midlatitude mountain ranges of Tien Shan (Kyrgyzstan) and Alps (France). *J. Geophys. Res.*, **113**, D15S08 (2008). doi:10.1029/2007JD008659.
5. Brogniez C., Auriol F., Deroo C., et al. Validation of satellite-based noontime UVI with NDACC ground-based instruments: influence of topography, environment and satellite overpass time. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 15049–15074 (2016). doi:10.5194/acp-16-15049-2016.
6. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., et al. AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1–16 (1998).

7. Holben B. N., Tanre D., Smirnov A., et al. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **106**, 12067–12097 (2001).
8. Milinevsky G., Danylevsky V., Bovchaliuk V., et al. Aerosol seasonal variations over urban sites in Ukraine and Belarus according to AERONET and POLDER measurements. *Atmospheric Measurements Techniques*, **7** (N 5), 1459–1474 (2014). doi:10.5194/amt-7-1459-2014.
9. Bovchaliuk A., Milinevsky G., Danylevsky V., et al. Variability of aerosol properties over Eastern Europe observed from ground and satellites in the period from 2003 to 2011. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13** (N 13), 6587–6602 (2013).
10. Dubovik O., King M. D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, **105**(D16), 20673–20696 (2000). doi: 10.1029/2000JD900282.
11. Matselskaya N., Kabashnikov V., Milinevsky G., et al. Atmospheric aerosol distribution in the Belarus-Ukraine region by the GEOS-Chem model and AERONET measurements, *International J. Remote Sensing*, **37**:14, 3181–3195 (2016). <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1194541>
12. Molod A., Takacs L., Suarez M., et al. The GEOS-5 Atmospheric General Circulation Model: Mean Climate and Development from MERRA to Fortuna. *Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation*, **28** (2012).
13. Bey I., Jacob D. J., Yantosca R. M., et al. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation. *J. Geophys. Res.*, **106** (D19), 23073–23095 (2001). doi: 10.1029/2001JD000807.
14. Martin R. V., Jacob D. J., Yantosca R. M., et al. Global and regional decreases in tropospheric oxidants from photochemical effects of aerosols. *J. Geophys. Res.: Atmospheres* (1984–2012), **108**(D3). ACH 6-1–ACH 6-9 (2003). doi: 10.1029/2002JD002622.
15. Gandin L. S. Objective analysis of meteorological fields. (Israel Program for Scientific Trans.), (Gidrometeorologicheskoe Izdatelstvo, Leningrad, 1963).
16. Lorenc A. C. Analysis methods for numerical weather prediction. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **112**, 1177–1194 (1986).
17. Zhang, X. F., Heemink, A. W., van Eijkeren, J. C. H. Data assimilation in transport models. *Appl. Math. Modelling*, **21**, 2–14 (1997).
18. Smirnov A., Holben B. N., Eck T. F., et al. Cloud-screening and Quality Control Algorithms for the AERONET Database. *Remote Sens. Environ.*, **73**, 337–349 (2000).

*Received 22.05.17*

*Н. С. Метельська<sup>1</sup>, В. П. Кабашников<sup>1</sup>,  
А. В. Норко<sup>1</sup>, А. П. Чайковський<sup>1</sup>, А. І. Бриль<sup>1</sup>,  
Г. П. Мілінєвський<sup>2,3,4</sup>, В. О. Данилевський<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Інститут фізики Національної академії наук Білорусі,  
Мінськ, Білорусь

<sup>2</sup> Київський національний університет імені Тараса  
Шевченка, Київ, Україна

<sup>3</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної  
академії наук України, Київ, Україна

<sup>4</sup> Цзілінський університет, Міжнародний центр науки  
майбутнього, Чанчунь, Китай

### МОДЕЛЮВАННЯ ВМІСТУ АЕРОЗОЛЮ В АТМОСФЕРІ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛІ GEOS-СНЕМ ДЛЯ ВАЛІДАЦІЇ КОСМІЧНОГО ПРОЕКТУ «АЕРОЗОЛЬ-UA»

В рамках глобальної хіміко-транспортної моделі GEOS-Chem розраховано розподіл середньомісячної об'ємної концентрації аерозолю і його дрібнодисперсної і крупнодисперсної фракцій для Мінська і Києва за період 2010–2015 рр. Результати модельних розрахунків зіставлено з вимірами на станціях наземної фотометричної мережі AERONET. Показано, що збіг є задовільним, але недостатнім для валідації супутниковых вимірювань майбутнього проекту «Аерозоль-UA» за допомогою результатів моделювання. Для підвищення точності оцінки просторово-часового розподілу об'ємної концентрації аерозолю пропонується використати асиміляцію вимірювань мережі AERONET у модель GEOS-Chem на основі методу оптимальної інтерполяції. Побудовано тимчасову кореляційну функцію для об'ємної концентрації дрібнодисперсної фракції аерозолю за даними вимірювань на станціях AERONET Мінськ за період 2002–2015 рр. та Київ за період 2008–2015 рр. На основі методу оптимальної інтерполяції отримано оцінки об'ємної концентрації дрібнодисперсної фракції аерозолю для усіх точок тимчасової шкали. Запропоновано метод оптимального усереднення даних вимірювань мережі AERONET на основі тимчасового методу оптимальної інтерполяції.

**Ключові слова:** аерозоль, хіміко-транспортна модель GEOS-Chem, асиміляція даних, сонячний фотометр.

Н. С. Метельская<sup>1</sup>, В. П. Кабашников<sup>1</sup>,  
А. В. Норко<sup>1</sup>, А. П. Чайковский<sup>1</sup>, А. И. Бриль<sup>1</sup>,  
Г. П. Милиневский<sup>2,3,4</sup>, В. А. Данилевский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Национальной академии наук  
Беларусь, Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Киевский национальный университет имени Тараса  
Шевченко, Киев, Украина

<sup>3</sup> Главная астрономическая обсерватория Национальной  
академии наук Украины, Киев, Украина

<sup>4</sup> Цзилинский университет, Международный центр  
науки будущего, Чанчунь, Китай

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АЭРОЗОЛЯ В АТМОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ GEOS-СНЕМ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО ПРОЕКТА «АЭРОЗОЛЬ-УА»

В рамках глобальной химико-транспортной модели GEOS-Chem рассчитаны распределения среднемесячной объёмной концентрации аэрозоля и его мелкодисперсной и крупнодисперсной фракций для Минска и Киева за период 2010–2015 гг. Результаты модельных расчётов сопоставлены с измерениями на станциях на-

земной фотометрической сети AERONET. Показано, что совпадение является удовлетворительным, но недостаточным для валидации спутниковых измерений в будущем проекте «Аэрозоль-УА» с помощью результатов моделирования. Для повышения точности оценки пространственно-временного распределения объёмной концентрации аэрозоля предлагается использовать ассимиляцию данных измерений сети AERONET в модель GEOS-Chem на основе метода оптимальной интерполяции. Построена временная корреляционная функция для объёмной концентрации мелкодисперсной фракции аэрозоля по данным измерений на станциях AERONET Минск за период 2002–2015 гг. и Киев за период 2008–2015 гг. На основе метода оптимальной интерполяции получены оценки объёмной концентрации мелкодисперсной фракции аэрозоля для всех точек временной шкалы. Предложен метод оптимального усреднения данных измерений сети AERONET на основе временного метода оптимальной интерполяции.

**Ключевые слова:** аэрозоль, химико-транспортная модель GEOS-Chem, ассимиляция данных, солнечный фотометр.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.03.011>

УДК 550.388: 621.396.98: 629.783

**Ю. П. Федоренко**

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина

## **ВОЗБУЖДЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ РС5 АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ**

*В наземных измерительных пунктах, удалённых от локального энерговыделения в атмосфере на расстояния 1500...10000 км, наблюдаются от двух до четырёх серий флуктуаций напряженности геомагнитного поля. В работе показано, что эти флуктуации возбуждаются крупномасштабными акустико-гравитационными волнами, пришедшими к измерительным пунктам от мест энерговыделения — стартов мощных ракет и падения крупного метеорита.*

**Ключевые слова:** серии флуктуаций напряженности геомагнитного поля, крупномасштабные акустико-гравитационные волны, места локального энерговыделения, старты мощных ракет, падение крупного метеорита.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Серии (пакеты) пульсаций напряженности геомагнитного поля (НГП) обнаруживаются в наземных измерительных пунктах (ИП), расположенных на удалениях 1500...10 000 км от мест стартов ракет и падения крупного метеорита [4, 6, 25–27, 22–24, 28, 33]. Последовательно во времени в ИП наблюдаются от двух до четырёх серий. Каждая серия пульсаций представляет собой 2...5 периодов квазигармонических колебаний геомагнитного поля. Для обнаруженных пульсаций характерна квазигармоническая форма и устойчивый режим колебаний в диапазоне периодов 7...12 мин. Ранее такие серии магнитных пульсаций от упомянутых источников никем не регистрировались, поэтому мы считаем, что нашими коллегами был выявлен новый физический эффект. Согласно общепринятой классификации [15, 42] геомагнитные пульсации с отмеченными периодами и режимом колебаний

относятся к классу *Pc5*. Границы периодов этого класса ( $T = 2.5\ldots 10$  мин) являются приближёнными.

Происхождение наземных геомагнитных пульсаций обычно связывают с магнитогидродинамическими волнами, возбуждаемыми в магнитосфере Земли и в солнечном ветре [11, 16]. Полагается, что *Pc5*-пульсации порождены высокоширотными событиями: восстановительной фазой суббури, потоками высыпающихся энергичных частиц радиационных поясов, возбуждением резонансных колебаний силовых линий геомагнитного поля [15]. Амплитуда таких пульсаций увеличивается с приближением ИП к высокоширотным источникам возмущений [11]. В последнее время появление геомагнитных пульсаций *Pc4* ( $T = 45\ldots 150$  с) ассоциируют еще и с распространением среднемасштабных акустико-гравитационных волн (АГВ) с горизонтальной длиной волны  $L = 100\ldots 500$  км [29]. В работе [13] сообщается о возбуждении магнитных пульсаций *Pi2* посредством взаимодействия АГВ с токовыми структурами ионосферы.

© Ю. П. ФЕДОРЕНКО, 2017

Серии геомагнитных  $Pc5$ -пульсаций, наблюдаемые после стартов ракет и падения крупного метеорита [4, 6, 25–27, 22–24, 28, 33], не связаны с высоколатitudными событиями. Такие флюктуации НГП регистрировались вблизи Харькова после энерговыделений, произошедших в высоких, средних и низких широтах. Исследователи, впервые описавшие это явление, полагают, что источник возбуждения всех серий пульсаций находится на ионосферных высотах. Скорости распространения вдоль поверхности земли передних фронтов всех серий обнаруженных геомагнитных колебаний вычислялись ими с использованием расстояния от предполагаемого очага возмущения на ионосферных высотах до ИП и задержкам передних фронтов каждой серии пульсаций. Местоположение очага возмущения при пусках ракет определялось по наземной проекции точки пересечения наклонной траектории ракеты с высотой максимума токовой струи (100...150 км), а задержка отсчитывалась от момента достижения ракетой упомянутой точки в ионосфере. Оказалось, что скорости распространения возмущений, вызывающих в ИП серии пульсаций НГП, сильно отличаются друг от друга. Поэтому авторы предположили, что каждая серия пульсаций транспортируется к ИП (или возбуждается над ИП), как правило, разным типом волн: магнитогидродинамическими, ударными акусто-гравитационными, внутренними гравитационными и инфразвуковыми. Вместе с тем хорошо известно, что лишь магнитогидродинамические волны возбуждаются только в плазме, т. е. на ионосферных высотах. Все другие указанные виды волн порождаются ещё в нейтральной атмосфере. Для стартов ракет возбуждение начинается с момента включения двигателя ракеты на поверхности Земли, продолжается в течение всего времени подъема ракеты до ионосферных высот, а затем и в самой ионосфере. Мы учили это, и поэтому в нашем анализе расстояние до ИП и задержки появления серий отличаются от тех, что приведены в публикациях наших коллег.

Мы считаем недостаточно обоснованными предположения, высказанные в работах [4, 6, 25–27, 22–24, 28, 33] о причине появления наблюде-

мых последовательностей серий пульсаций, а также расчёты скоростей распространения возмущений. Также следует отметить, что авторы указали лишь на возможную причастность упомянутых ими волн для транспортировки возмущений от источника (очага) к ИП, природа и механизм возникновения регистрируемых серий магнитных флюктуаций ими не рассматривались.

По этой причине в настоящей работе мы не использовали ни скорости распространения возмущений, ни гипотезы механизмов их порождения, приведенные в упомянутых публикациях. Скорости распространения серий возмущений рассчитаны по полученным нами зависимостям, приведены доказательства в пользу того, что обнаруживаемые в ИП последовательные во времени серии пульсаций возбуждаются только акусто-гравитационными волнами, порождаемыми в очаге возмущения, предложен механизм возникновения этого нового физического эффекта. Источник возмущения (энерговыделения) может находиться как в неионизированной атмосфере (в частности, на поверхности Земли), так и на ионосферных высотах. Мы считаем, что пульсации геомагнитного поля генерируются лишь на ионосферных высотах (по всему пути распространения АГВ и, в частности, над ИП). Причиной возникновения наблюдаемых в ИП флюктуаций НГП является только фрагмент АГВ, распространяющийся в данный момент над ИП. Последнее утверждение в качестве предположения высказывалось и в работе [22] при объяснении природы появления низкоскоростных пульсаций (второй и третьей серий флюктуаций). Надёжно установлено [37], что АГВ без существенного затухания способны распространяться на континентальные расстояния, следовательно, и возбуждаемые ими НГП могут наблюдаться на столь больших удалениях от источника возмущения атмосферы.

В статье предложена единая модель возбуждения всей последовательности серий колебаний НГП, регистрируемых в ИП после упомянутых удалённых энерговыделений. Для её проверки использованы экспериментальные данные, взятые из работ [4, 6, 25–27, 22–24, 28, 33]. Показано, что пульсации  $Pc5$  над ИП возбуждаются

крупномасштабными АГВ, порождёнными удалёнными источниками энерговыделения, описывается механизм генерации пульсаций, высказываются предложения по прикладному использованию нового физического эффекта.

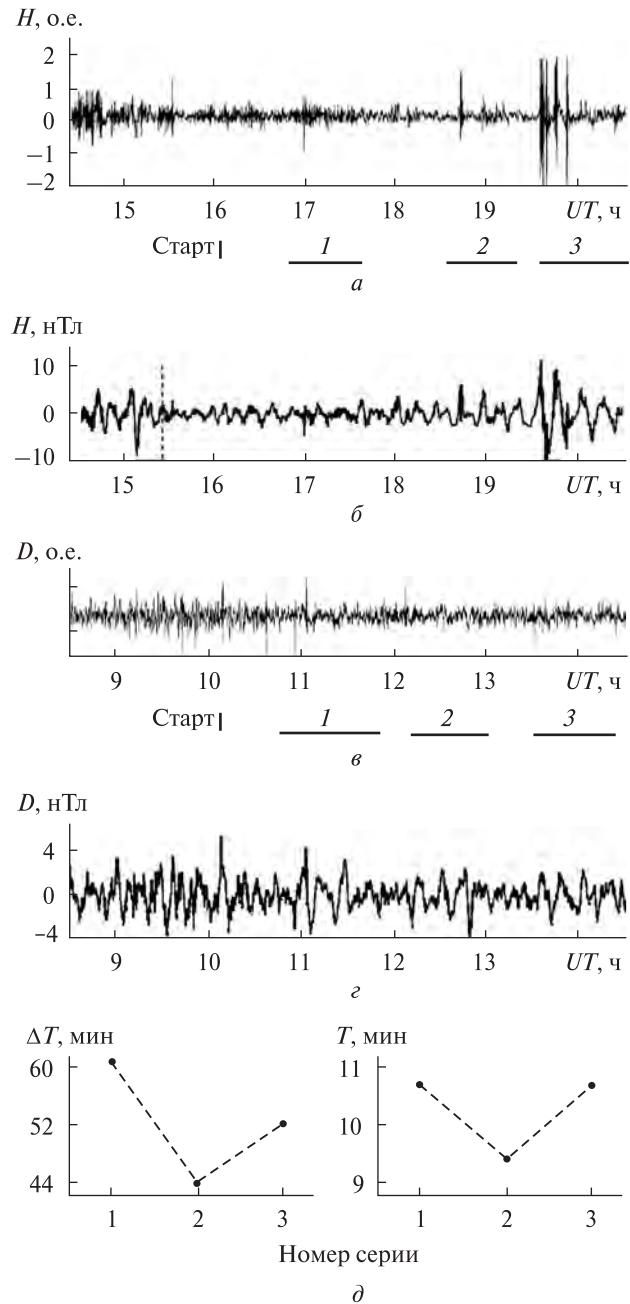
## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерения горизонтальных ( $H$  и  $D$ ) составляющих вектора геомагнитных флуктуаций выполнялись при помощи высокочувствительного магнитометра-флюксметра, расположенного в ИП Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (с. Граково, Чугуевский район, Харьковская обл.) [6]. Его географические координаты: 49.39°N, 36.56°E.

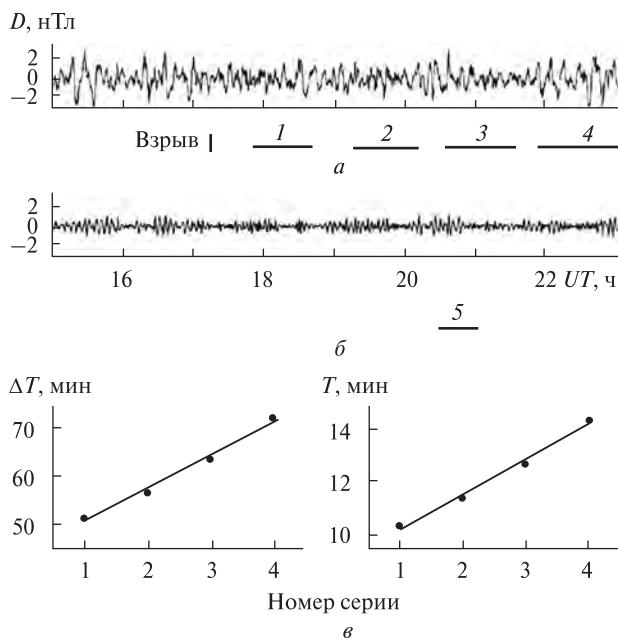
На рис. 1, *a*, *b* показаны два характерных примера геомагнитных пульсаций для  $H$ - и  $D$ -составляющих НГП в интервале 6 ч (1.5 ч до старта и 4.5 ч после старта с космодрома Сичан (Китай) ракет типа «Лонг Марч-3А». Примеры заимствованы из работы [26]. На регистрациях каждой из составляющих имеется по три серии пульсаций. Они отмечены жирными линиями вдоль временной оси и пронумерованы цифрами 1, 2, 3. Как известно,  $H$ -составляющая НГП совпадает с плоскостью магнитного меридиана, а  $D$ -составляющая ортогональна к  $H$ -составляющей.

На рис. 1, *a* представлена времененная зависимость вариаций  $H$ -составляющей, зарегистрированной 14 ноября 2003 г., а на рис. 1, *b* — кривая, полученная путём фильтрации в диапазоне периодов 300...1000 с исходной регистрограммы (рис. 1, *a*), измеренной в диапазоне периодов 1...1000 с. Согласно заключениям, сделанным в работе [26], в первой серии пульсаций данного примера имело место изменение характера колебательного процесса, во второй наблюдалось незначительное изменение амплитуды и появление высокочастотной составляющей. Отчетливо фиксируемое увеличение амплитуды до 7 нТл произошло на третьей серии, оно сопровождалось увеличением периодов вариаций  $H$ -составляющей НГП до 14...15 мин.

На рис. 1, *c* показаны аналогичные результаты для флуктуаций  $D$ -компоненты, наблюдавшихся 24 октября 2007 г. В работе [26] отмечалось, что в



*Рис. 1.* Фрагменты записей вариаций  $H$ - и  $D$ -компонент, зарегистрированных после стартов ракет типа «Лонг Марч-3А» с космодрома Китая Сичан: *a* — 14 ноября 2003 г. в 16:01 UT, *b* — 24 октября 2007 г. в 10:05 UT. Кривые *б* и *г* получены путём фильтрации в диапазоне периодов 300...1000 с исходных регистрограмм, измеренных в диапазоне периодов 1...1000 с (горизонтальными полосками 1, 2 и 3 отмечены интервалы наблюдений первых трех серий БВ-колебаний, вертикальной чертой — момент старта, штриховой линией — момент захода Солнца на высоте 200 км над ИП); *д* — длительности  $\Delta T$  серий и средние значения периодов  $T$  флуктуаций для  $D$ -компонента



**Рис. 2.** Фрагмент записи вариаций  $H$ -компоненты, зарегистрированного после падения Витимского болида, взорвавшегося 24.09.2002 г. в 16:48:56 UT: регистрограммы *а* и *б* получены путем фильтрации записи магнитометра-флюксметра в диапазонах периодов 1...1000 с и 100...300 с соответственно, *в* — зависимости длительностей  $\Delta T$  серий и периодов  $T$  колебаний от номера серии, рассчитанные по данным рис. 2, *а*. Сплошная прямая — линейная регрессия с коэффициентом корреляции 0.99

ходе наблюдения первой серии, так же, как и на рис. 1, *а*, изменился характер колебаний по сравнению с предшествующим фрагментом регистрации. Период колебаний составлял 10...11 мин. Во второй серии колебаний период равнялся 7...12 мин, а в третьей увеличился до 7...14 мин. На рис. 1, *д* для старта 24 октября 2007 г., иллюстрируются длительности каждой серии и средние значения периодов их флюктуаций.

Регистрации, приведенные на рис. 1, *а*, *в*, характерны тем, что в них отдельные серии колебаний выявляются не очень отчетливо. Нечётко выраженные серии наблюдаются в подавляющем числе других экспериментов, а в некоторых случаях нечётко проявляются все серии. Причина этого обусловлена малой величиной эффекта и мешающими фоновыми возмущениями. На рис. 2, *а* приводятся наиболее чёткие регистра-

ции исследуемого нового физического эффекта. Они получены после взрыва Витимского болида 24 сентября 2002 г. в 16:48:56 UT на высоте 30 км над пунктом с координатами 58.21°N, 113.46°E [22]. Энергия взрыва превышала энергию пусков самых мощных ракет-носителей типа «Спейс Шаттл» на три порядка. Поэтому было зарегистрировано не три серии колебаний, как во всех других экспериментах, а четыре, и все они проявились очень ясно. При этом их амплитуды были сравнимы с амплитудой серий колебаний во всех ракетных экспериментах. Данные в этом эксперименте из-за своего высокого качества наиболее пригодны для достоверного анализа.

В работе [22] утверждается, что обнаружено не четыре (как мы считаем), а пять серий пульсаций. Однако пятая серия (см. рис. 2, *а*) зарегистрирована в существенно суженном диапазоне фильтрации 100...300 с. Амплитуда и средний период пятой серии колебаний более чем в два раза меньше соответствующих параметров флюктуаций предшествующих четырёх серий. Мы полагаем, что природа пятой серии не связана с исследуемым возмущением, и поэтому упомянутая серия исключена из нашего дальнейшего анализа.

Продолжительность пульсаций и их средний период в четырёх сериях (см. рис. 2, *а*, *б*) возрастают по линейному закону. В каждой серии наблюдалось пять периодов. Продолжительность колебаний изменялась от 51 мин для первой серии до 72 мин для четвёртой серии; средний период возрастал от 10 мин для первой серии до 14 мин для четвёртой серии. Графики зависимостей длительности серии и среднего периода колебаний от номера серии показаны на рис. 2, *б*. Здесь сплошными линиями иллюстрируются линейные регрессии указанных параметров. Коэффициент корреляции для обеих регрессий составляет 0.99. Важно отметить, что в ходе каждой серии амплитуда пульсаций практически не изменялась, а в четвёртой серии на последней трети её длительности даже увеличивалась. Мы также обращаем внимание на резкий, внезапный характер завершения пульсаций каждой серии. По результатам исследования всего объёма данных (полученных для ракет-носителей с различной грузоподъёмностью и запущенных с космо-

дромов, расположенных на расстояниях 1500...10000 км от ИП) оказалось, что продолжительности первых трёх серий линейно увеличиваются при увеличении расстояния между космодромом и ИП. Наибольший рост продолжительности в указанном диапазоне расстояний наблюдался для первой серии: от 20 до 60 мин. Объяснение отмеченных эффектов на основе предложенного механизма возникновения пульсаций приводится в экспериментальной части статьи.

### МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Сначала опишем механизм возбуждения пульсации очень кратко. Объём воздуха, расположенный над ИП, в ходе распространения через него акустико-гравитационной волны подвергается механическому воздействию (сжатию и разрежению, смещению). При определенных условиях одним из результатов этого воздействия является возбуждение вертикальных резонансных колебаний объёмов воздуха атмосферы Земли с частотой Брента-Вайсяля  $T_{BV}$  (далее — БВ-колебания). Такие колебания воздуха над ИП на высотах ионосферы представляют собой колебания квазинейтральной гиротропной ионосферной плазмы. Колебания плазмы приводят к появлению переменного электрического тока с тем же периодом  $T_{BV}$ , порождающего переменное магнитное поле. Сложение этого поля с геомагнитным полем и порождает пульсации НГП, регистрируемые в ИП.

Упомянутое механическое воздействие на плазму и возникновение пульсаций происходит и вдоль всего пути распространения АГВ в ионосфере, однако в ИП в основном регистрируются лишь те флуктуации магнитного поля, которые порождены процессами в ионосфере, расположенной непосредственно над ИП. Это происходит потому, что пульсации местного (локального) происхождения доминируют над флуктуациями НГП, возбуждаемыми на расстояниях в сотни и тысячи километров от ИП.

Как отмечалось, предполагается, что наблюдаемые в ИП пульсации НГП возбуждаются локально над ИП акустико-гравитационными волнами, пришедшими от места энерговыделения.

Наше рассмотрение механизма возбуждения пульсаций основывается на рассмотрении токов и магнитных полей в квазинейтральной гиротропной ионосферной плазме в приближении гидродинамики [3], а также на модели атмосферных возмущений, приведенной в [18, 20, 35]. Без понимания сущности модели АГВ затруднительно уяснить механизм генерации магнитных пульсаций. Поэтому изложим вначале основные положения этой модели, а затем детально опишем механизм генерации пульсаций НГП.

*Из истории исследования акустико-гравитационных волн.* Исследования АГВ начались наземными радиофизическими методами с наблюдений движения ионизированных компонентов атмосферы. Эксперименты по обнаружению горизонтальных движений в области F2 ионосферы впервые проведены в 1942 и 1943 гг. [31]. В экспериментальных исследованиях [45] впервые обнаружены ярко выраженные, «классические» горизонтально перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), высказано предположение о том, что такие ионосферные неоднородности вызываются волной атмосферного давления. Первые регистрациями быстро перемещающихся по вертикали возмущений ионосферы, возбуждающих горизонтально перемещающиеся ПИВ, приведены в исследовании [49]. Эти вертикально движущиеся возмущения наблюдались в период магнитной бури 25–26 марта 1946 г., они были вызваны высыпанием частиц солнечного ветра в магнитосферный касп.

Первая оригинальная попытка теоретической интерпретации горизонтальных ПИВ предпринята в исследовании [44], где для объяснения упомянутого явления были впервые привлечены процессы, происходящие в нейтральной атмосфере. В работе [39] впервые получено упрощённое решение уравнений геофизической гидродинамики для объяснения ПИВ. С этой пионерской работы фактически начинаются исследования по разработке теории АГВ.

Уравнения геофизической гидродинамики, описывающие распространение волн в атмосфере, исследовались на протяжении семи десятилетий неоднократно. Итоги и нерешённые вопросы исследований по акустико-гравитацион-

ным волнам в атмосфере Земли за 40-летний период детально изложены в обзорах [8, 9, 37, 40, 41]. Дисперсионные уравнения для АГВ выведены и проанализированы в работах [8, 9, 36, 37, 39–41, 50]. Отличия в решениях обусловлены лишь использованными приближениями и моделями среды. В основе этих исследований лежит работа [39], в которой впервые получено упомянутое дисперсионное уравнение, справедливое лишь для линеаризованных уравнений геофизической гидродинамики. Мало кто из исследователей рассматривал уравнения геофизической гидродинамики для условий, когда возмущения атмосферного давления составляют не доли и единицы процентов, а десятки процентов относительно фона (невозмущённых условий). Для последнего случая эти уравнения решались лишь численно, наиболее надёжными мы считаем расчёты [12]. Вместе с тем не все полученные результаты, даже для линеаризованных уравнений, до конца осознаны исследователями.

Единая полуэмпирическая модель АГВ (для крупно- и среднемасштабных волн) разработана в 2013 г. в работе [35]. Более подробно она излагается и обсуждается под названием *Ukrain-2013* в работах [18, 20]. Эта модель радикально отличается от всех предшествующих моделей, построена на основе теории возмущения атмосферы локальным источником выделения энергии и импульса [36, 43, 48, 50].

Чем же плоха гипотеза распространения АГВ, предложенная в 1960 г. в работе [39] гениальным учёным Хайнсом (Hines C. O.)? Почему оказалось необходимым прибегнуть к другим теориям? Эти исключительно важные вопросы заслуживают более подробного рассмотрения. Напоминаем, что Хайнс для недиссипативной среды записал систему уравнений геофизической гидродинамики и впервые решил её в линейном приближении, получив дисперсионное уравнение (и поляризационные соотношения к нему). Из этого уравнения следует, что на больших расстояниях от источника возбуждения (зарождения) АГВ-возмущение представляет собой волновой процесс (в простейшем случае — плоскую двумерную волну), который характеризуется временным и пространственным периодами,

определенными свойствами среды распространения. Важно подчеркнуть, что Хайнс для получения аналитического решения уравнений геофизической гидродинамики использовал допущение о том, что относительные возмущения параметров среды (давления, плотности, температуры, скорости движения частиц в волне) распространения в АГВ много меньше единицы. Без этого упрощающего ограничения получить дисперсионное уравнение (аналитическое решение) невозможно. Дисперсионное уравнение выводится только для системы линейных уравнений. В 1960-м г. исследования АГВ-ПИВ только начинались, надёжных экспериментальных значений относительных амплитуд возмущений было ещё недостаточно. Поэтому у Хайнса соблазн линеаризации уравнений гидродинамики был очень велик. Поскольку в этом случае можно получить решение в аналитическом виде. Конечно, этот подход был оправданным, так всегда разумно поступать в начале исследования нового явления. Однако за семидесятилетний период исследований (особенно за последние десять лет) было установлено, что для глобально наблюдаемых АГВ-ПИВ это приближение не выполняется. Однако гипотеза, основанная на невыполнимых условиях многие (однако далеко не все) свойства АГВ описывала правильно. В настоящем никто подробно ещё не исследовал этот удивительный эффект. При этом отмечаем, что гипотеза Хайнса не может объяснить целый ряд эффектов, надёжно обнаруженных при экспериментальном изучении АГВ. В частности, АГВ-волна является не гармонической, как утверждает гипотеза Хайнса, а квазигармонической; наблюдается на первый взгляд парадоксальный эффект, заключающийся в том, что скорости экстремумов цуга АГВ не изменяются в ходе их распространения в атмосфере. При этом упомянутые скорости убывают с повышением номера экстремума, начальные скорости цуга АГВ могут превышать скорость звука в несколько раз, а не быть дозвуковыми, как явствует из гипотезы Хайнса. Эти и другие особенности модели *Ukrain-2013* подробно изложены в [18, 20, 35]. Краткое описание модели приводится в следующем разделе.

Для ясности последующего изложения остановимся на используемой в настоящее время терминологии. АГВ и ПИВ — это связанные, протекающие одновременно явления, имеющие общие характеристики: пространственный масштаб, скорость распространения, направление (азимут) распространения, период, наклон фазового фронта, появляемость и др. Эти параметры удобно рассматривать в рамках совместной модели. Поэтому там, где идет речь об упомянутых характеристиках или о взаимосвязи АГВ и ПИВ (когда рассматривается явление в целом), для лаконичности изложения, а также для того, чтобы подчеркнуть, что распространение АГВ в ионосфере и появление ПИВ — это единый волновой процесс, нами используется сочетание аббревиатур АГВ-ПИВ. Модель Ukrain-2013,ложенная в основу нашего механизма порождения PC5-пульсаций, является моделью АГВ-ПИВ.

В ходе 70-летнего периода исследований атмосферных волн аббревиатура АГВ применялась в статьях, монографиях и докладах как для термина «акустико-гравитационные волны», так и для термина «атмосферные гравитационные волны». Англоязычная аббревиатура AGW использовалась для «acoustic-gravity waves» и для «atmospheric gravity waves» в трудах на английском языке. Это не вызывало недоразумений у специалистов, так как сокращения всегда расшифровывались в тексте. Мы полагаем, что термин «акустико-гравитационная волна» более точно отражает сущность рассматриваемого явления, в особенности если рассматривается волновое явление в атмосфере в целом — с момента энерговыделения до момента регистрации эффектов на расстояниях в тысячи километров спустя от нескольких десятков минут до 5...10 ч.

В заключение совершим небольшой экскурс в далёкое прошлое. Из-за большого авторитета гениального древнегреческого учёного Аристотеля его ошибочные заключения в физике и астрономии просуществовали почти два тысячелетия. Столь большой период заблуждений объясняется почти религиозной верой в справедливость всего его учения. Аналогичная ситуация сложилась и с учением Хайнца, которое и до сих пор (в течение около 70 лет) многие учёные считают

абсолютно верным. Религия и наука рассматривают непересекающиеся сущности. Многие учёные 18—20 веков были глубоко религиозными. Однако это не препятствовало им отвоёывать (открывать) у естествознания законы, изначально начертанные Всевышним. Мы полагаем, что обсуждаемая статья будет способствовать освобождению от заблуждений прошлых исследований, благоприятствовать всестороннему развитию исследований нового геофизического эффекта (генерации серий геомагнитных пульсаций) и теории АГВ.

**Краткое описание модели АГВ-ПИВ.** Есть мнение, что крупномасштабные (КМ) с пространственной длиной волны  $L > 1000$  км и среднемасштабные (СМ) с  $L$  от 150...200 до 800 км АГВ-ПИВ имеют различную природу зарождения. В подавляющем большинстве исследований отмечается, что крупномасштабные неоднородности часто наблюдаются после начала магнитных бурь, а неоднородности средних масштабов регистрируются в ходе ядерных экспериментов, взрывов вулканов, высыпания энергичных частиц в магнитосферные каспы и др.

Однако, из многолетних экспериментальных исследований, выполненных автором с использованием трансионосферного радиопросвещивания ионосферы с борта низкоорбитальных ИСЗ, следует, что природа АГВ-ПИВ обоих масштабов едина, а КМ- и СМ-виды являются различными пространственно-временными стадиями (этапами) динамики одного и того же исходного возмущения, возбуждаемого локальным источником (энергетическим толчком). Согласно модели [18, 35], источник возбуждения АГВ-ПИВ представляет собой некоторый объём в атмосфере Земли, в котором на протяжении около часа происходят колебания давления воздуха с полупериодом около 4 мин.

В результате от источника по всем направлениям распространяется пространственный цуг возмущений параметров атмосферы. Амплитуда колебаний давления воздуха в объеме уменьшается со временем, то есть с увеличением номера экстремума. Например, амплитуда экстремумов с номерами более 16 относительно максимального (третьего) экстремума составляет менее 20 %.

Задержки появления экстремумов с номерами более 16 относительно начала возмущения (начала колебаний в очаге возмущения) — более часа. Если начальный экстремум порождает волну, распространяющуюся со скоростью более 11 км/с, то 15-й экстремум возбуждает волну со скоростью всего лишь около 70 м/с. Наиболее сильно убывают скорости распространения начальных высокоскоростных экстремумов, что приводит к резкому уменьшению пространственных длин волн лидирующих периодов цуга АГВ. Вначале от очага возмущения распространяются крупномасштабные неоднородности, пространственные размеры которых для каждого следующего экстремума уменьшаются (по закону, который описан в модели) вплоть до среднемасштабных.

Горизонтальные размеры среднемасштабных АГВ-ПИВ также уменьшаются с появлением каждого нового экстремума, однако это уменьшение происходит не так резко, как в случае с крупномасштабными неоднородностями. Из-за различия скоростей распространения смежных экстремумов среднемасштабных АГВ-ПИВ происходит «вытягивание» пространственного цуга с удалением от источника его зарождения, и неоднородности становятся крупномасштабными. На расстояниях более восьми тысяч километров от очага возмущения все АГВ-ПИВ являются крупномасштабными.

Такой сценарий динамики пространственных масштабов одинаков для источников возмущений всех типов (взрывы вулканов, ядерные эксперименты, высыпания частиц, падение крупных метеоритов и др.). Один и тот же источник порождает как КМ, так и СМ-возмущения, происходит это с разными задержками относительно начала возбуждения колебаний («включения» источника возмущений). Таким образом, обсуждаемая модель описывает генерацию АГВ-ПИВ всех масштабов, она является общей (единой) моделью АГВ-ПИВ (для КМ- и СМ- неоднородностей).

**Детальное описание механизма генерации пульсаций.** Рассмотрим теперь нашу гипотезу более подробно, изложим механизм возникновения магнитных пульсаций. Как отмечалось, для этой

цели использована модель АГВ-ПИВ [18, 35]. Проанализируем структуру и параметры АГВ, ответственные за порождение обнаруженных в ИП флюктуаций напряжённости геомагнитного поля.

**Элементы цуга АГВ, запускающие ЕВ-колебания.** Согласно многочисленным данным экспериментов [4, 6, 25–27, 22–24, 28, 33], в ИП, расположенных на расстояниях  $R = 1500\ldots10000$  км от источника возмущений, после каждого энерговыделения с энергией  $Q = 4 \cdot 10^{-5}\ldots2 \cdot 10^{-4}$  Мт ТНТ наблюдается в основном по три серии флюктуаций НГП. Причина проявления только трёх серий объясняется структурой цуга АГВ: лишь три лидирующих квазипериода волны возмущения с наибольшими амплитудами приносят к ИП механическую энергию, достаточную для возбуждения надёжно обнаруживаемых флюктуаций НГП. Каждый из этих квазипериодов цуга атмосферной волны возбуждает свою серию магнитных пульсаций. Последующие квазипериоды цуга, конечно, также приводят к флюктуациям напряжённости геомагнитного поля, однако их амплитуда обычно оказывается ниже чувствительности использованного в экспериментах магнитометра. Такой вывод подтверждается экспериментально: при энергии источника  $Q = 0.2$  Мт ТНТ (что больше энергии упомянутых выше источников в  $10^3\ldots10^4$  раз) проявляется ещё одна серия колебаний, порождённая последующим (четвёртым) периодом АГВ с существенно меньшей амплитудой (подробнее см. ниже исследование Витимского болида).

На графике, приведенном на рис. 3, показан фрагмент временного цуга АГВ для его первых семи периодов, последовательно зарождающихся над очагом исходного возмущения. Цуг представляет собой колебания давления атмосферы, начинающиеся в момент *onset* минимумом с относительным значением  $A_0 = \Delta p / \Delta p_{\max 2} = 0.48$ . Здесь  $\Delta p = p - p_0$ ,  $p$  и  $p_0$  — текущее и невозмущённое фоновые значения давления атмосферы,  $\Delta p_{\max 2}$  — значение  $\Delta p$  во втором (наибольшем) максимуме цуга. Относительная амплитуда произвольного экстремума в цуге далее обозначена как  $A_r$ . Полупериод этих колебаний постоянен, он равен  $\tau_0 = 3.95$  мин. Каждую точку линии графика рис. 3 далее будем называть минималь-

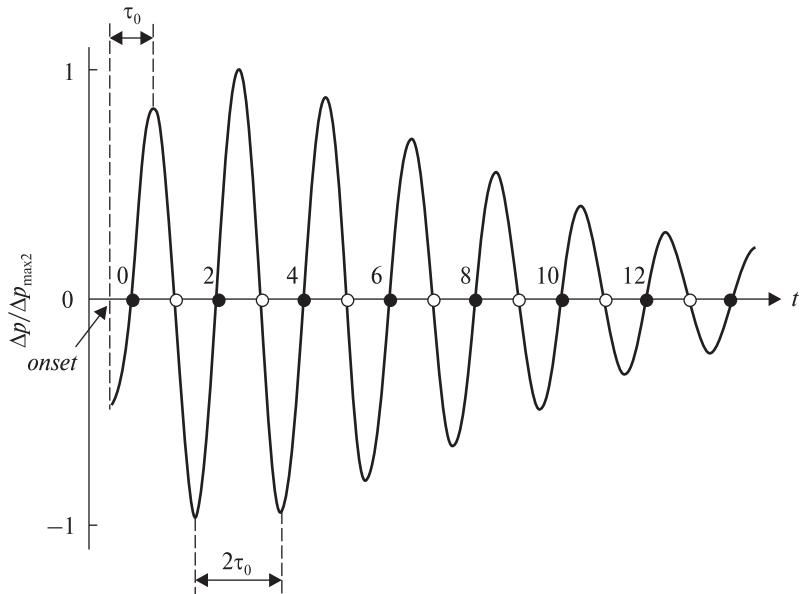


Рис. 3. Фрагмент временного цуга АГВ для его лидирующих семи периодов; *onset* — момент начала возмущения с относительным значением амплитуды  $A_0 = \Delta p / \Delta p_{\max 2} = 0.48$ ,  $\Delta p = p - p_0$ ,  $p$  и  $p_0$  — текущее и невозмущённые фоновые значения давления атмосферы,  $\Delta p_{\max 2}$  — значение  $\Delta p$  во втором максимуме цуга. Период колебаний равен  $2\tau_0$ ,  $\tau_0 = 3.95$  мин

ным фрагментом цуга. Промежуток времени между смежными максимумами (минимумами) и всеми другими соседними минимальными фрагментами цуга с одинаковой фазой равен  $2\tau_0$ .

В табл. 1 для первых шестнадцати экстремумов цуга АГВ приведены значения относительного атмосферного давления  $A_i$  и скорости  $V_i$  распространения в горизонтальном направлении волны, вызванной этим экстремумом ( $i$  — порядковый номер экстремума, нечетные значения  $i$  соответствуют максимумам цуга, а четные — его минимумам, при этом отсчёт начинается с нуля) [18, 35].

Генерацию НГП могут запускать фрагменты цуга, начинающиеся с невозмущенных значений давления воздуха (ниже в тексте для краткости эти участки именуются *нулями* цуга АГВ). В табл. 2 для каждого нуля временного цуга  $i_0$  (порядкового номера нуля) приводится значение фазовой горизонтальной скорости распространения волны, возбуждаемой этим нулем.

В статье задержка каждой серии пульсаций НГП определяется разностью времени начала этой серии над ИП и времени генерации в очаге возбуждения соответствующего возрастающего нуля цуга (порождающего в ИП выбранную серию колебаний). За начало серии принята середина первой флюктуации серии. Задержка по-

рождения нулей цуга по отношению к моменту *onset* определяется по формуле

$$\Delta t_i = 0.5\tau_0 + i_0\tau_0. \quad (1)$$

Нуль цуга с индексом нуль порождается с задержкой  $0.5\tau_0$  после *onset*, с индексом один — с задержкой  $1.5\tau_0$ , с индексом два —  $2.5\tau_0$ , с индексом три —  $3.5\tau_0$  и т. д. Важно подчеркнуть,

Таблица 1. Зависимость  $V_i$  и  $A_i$  от номера экстремума  $i$

Экстремум	$i$	$A_i$	$V_i$ , км/с
Min	0	0.48	11.3155
Max	1	0.83	3.0000
Min	2	0.97	1.1539
Max	3	1	0.6820
Min	4	0.95	0.4688
Max	5	0.88	0.3571
Min	6	0.8	0.2809
Max	7	0.7	0.2381
Min	8	0.65	0.2000
Max	9	0.55	0.1754
Min	10	0.49	0.1585
Max	11	0.41	0.1415
Min	12	0.35	0.1245
Max	13	0.29	0.1076
Min	14	0.25	0.0906
Max	15	0.22	0.0736

Таблица 2. Зависимость скорости  $V_{0i}$  от номера  $i_{0i}$ 

$i_{0i}$	$V_{0i}$ , км/с	$i_{0i}$	$V_{0i}$ , км/с
0	7.5000	8	0.1858
1	1.7500	9	0.1660
2	0.8540	10	0.1513
3	0.5618	11	0.1328
4	0.4041	12	0.1148
5	0.3137	13	0.1017
6	0.2593	14	0.0820
7	0.2176		

что нули и экстремумы цуга (как и все другие элементы цуга) возбуждаются с известными задержками относительно *onset*.

Первые три периода цуга АГВ имеют не только наибольшие значения относительных амплитуд атмосферного давления (по модулю), но и наибольшие скорости распространения волн, возбуждаемых этими экстремумами. Значения скоростей распространения волн, возбуждаемых смежными экстремумами, отличаются наиболее сильно в начале цуга АГВ (в лидирующей его части, см. табл. 1).

Поэтому уже при  $R \sim 1500$  км пространственное положение четырёх начальных экстремумов будут формировать горизонтальный квазипериод  $L > 1000$  км. С увеличением значений  $R$  горизонтальный квазипериод АГВ увеличивается. Такие периоды относятся к КМ АГВ.

Нуль цуга на участке возрастающего давления далее будем для краткости называть возрастающим нулем, а нуль на участке ниспадающего давления — убывающим нулем. Чёрными и белыми кружками-маркерами, расположенными на оси времени  $t$  рис. 3, отмечены соответственно возрастающие и убывающие нули. Временной интервал между смежными максимумами или минимумами (и всеми другими одинаковыми значениями фазы) цуга равен  $2\tau_0$ . Таким образом, временной период квазигармонического пространственного цуга, когда он только зарождается (начинает свое движение от источника возмущения), равен  $2\tau_0$ . Абсолютные значения экстремумов давления воздуха цуга, начиная с

третьего (со второго максимума), монотонно убывают (см. табл. 1 и рис. 3).

*Возбуждение колебаний воздуха с периодом  $T_{BV}$ .* Давление и вертикальная скорость воздуха в волне над ИП определяется фазой цуга АГВ. Если над ИП давление в волне достигает максимального либо минимального значения (экстремумы  $A_i$ ), то скорость частиц воздуха в эти моменты времени равна нулю. Наибольшая скорость вертикального ветра в волне (и мощность, импульс потока) наблюдается в нулевых точках пространственно-временного цуга акусто-гравитационной волны. На рис. 3 эти точки расположены приблизительно посередине участков минимум — максимум и максимум — минимум. В смежных нулевых точках временного цуга значения скорости ветра (воздуха) будут максимальными и противоположно направленными.

Возрастающий нуль с индексом «0» является первым в цуге АГВ (см. рис. 1). Поэтому он первым возбуждает серию колебаний атмосферного давления с периодом  $T_{BV}$  (ранее, при рассмотрении пульсаций НГП, она именовалась как первая серия). Этот участок цуга АГВ играет роль механического толчка, запускающего резонансные колебания. При этом ветер дует сверху вниз, к поверхности Земли (в область повышенных фоновых значений атмосферы). По экспериментальным данным мы установили, что колебания, порождённые возрастающим нулем, могут исчезать до появления убывающего нуля, могут продолжаться вплоть до его появления или даже после прихода к ИП упомянутого нуля. При этом продолжительность колебаний в сериях изменяется от нескольких десятков минут до часа и более (длительность колебаний пропорциональна расстоянию между ИП и источником возмущения). В течение длительности каждой серии флюктуации давления среды, вызванные возрастающим нулем, генерируют ионосферные токи, а те, в свою очередь, порождают флюктуации компонентов магнитного поля.

Возбуждённый убывающим нулем поток воздуха, дующий снизу верх (от поверхности Земли, в сторону понижения фоновых значений давления атмосферы) резонансные колебания не вызывает. Этот экспериментальный факт, видимо,

объясняется тем, что энергия потока расходуется на перемещение частиц среды вверх, что осуществляется без большого сопротивления со стороны окружающего воздуха, ведь его фоновое давление понижается с ростом высоты (выбранного объёма воздуха волне). В момент перемещения убывающего нуля над ИП механический толчок не происходит, поэтому  $T_{BV}$ -колебания не возникают.

В экспериментах период флюктуаций НГП в каждой серии измерялся в работах [4, 6, 25–27, 22–24, 28, 33] как интервал времени между смежными максимумами пульсаций. При этом момент возбуждения выбранной серии колебаний определяется по ее переднему фронту (по первому максимуму серии осцилляций). Времена появления над ИП каждой серии таких БВ-колебаний мы связываем с приходом соответствующего возрастающего нуля цуга АГВ. Согласно модельным расчётам [46] в высотном диапазоне 250...400 км над поверхностью Земли период колебаний  $T_{BV}$  является возрастающей зависимостью (ближкой к линейной). Минимальные значения  $T_{BV} \approx 8$  мин имеют место на нижней границе указанного высотного диапазона приочных условиях и минимуме солнечной активности. На верхней границе диапазона наблюдаются максимальные значения  $T_{BV} \approx 19$  мин в дневных условиях при максимуме солнечной активности. Для произвольного момента времени высотный профиль  $T_{BV}$  в указанном высотном диапазоне является возрастающей зависимостью. В течение суток в области высоты максимума ионизации значения  $T_{BV}$  изменяются пропорционально изменениям  $z_m$ . Упомянутые выше периоды флюктуаций обнаружены в сериях геомагнитных колебаний [4, 6, 25–27, 22–24, 28, 33], что подтверждает нашу гипотезу о природе исследуемого явления (эффекта). Экспериментально наблюдаемая привязка времени начала всех трёх серий магнитных флюктуаций к моменту прохождения возрастающих нулей также свидетельствует в пользу адекватности предлагаемого механизма.

**Токи и магнитные поля в ионосферной плазме, порождаемые распространением акустико-гравитационных волн.** Как уже отмечалось, возникно-

вение рассматриваемых пульсаций НГП является следствием появления переменного электрического тока в объеме плазмы над ИП. Рассмотрим ток в квазинейтральной гиротропной ионосферной плазме, расположенной над ИП, в приближении гидродинамики: плазма состоит из нейтрального, ионного и электронного газов, проникающих один в другой и взаимодействующих посредством соударений. Ток определяется как суммарный заряд, переносимый в единицу времени ионным и электронным потоками. В нашем упрощённом рассмотрении явления все ионы полагаются однозарядными положительными с равной массой. При таких допущениях плотность тока  $\mathbf{j}$  описывается уравнением [3]

$$\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} + \frac{e}{m_e c} [\mathbf{j} \cdot \mathbf{B}] + v_e \mathbf{j} = \frac{Ne^2}{m_e} \left( \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{V}_p \cdot \mathbf{B}] \right) + \frac{e}{m_e c} \nabla p, \quad (2)$$

где  $\mathbf{j} = Ne(\mathbf{V}_{ion} - \mathbf{V}_e)$  — вектор плотности тока,  $N$  — электронная концентрация,  $\mathbf{V}_{ion}$ ,  $\mathbf{V}_e$  — векторы скорости ионов и электронов (направленного движения ионного и электронного газов).  $v_e = v_{ei} + v_{en}$ ,  $v_{ei}$ ,  $v_{en}$  — частоты столкновений электронов с ионами и нейтралами,  $e$ ,  $m_e$  — заряд и масса электрона,  $c$  — скорость света в вакууме,  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукции постоянного магнитного поля,  $\mathbf{E}$  — вектор напряжённости электрического поля,  $\mathbf{V}_p = \frac{\rho_e \mathbf{V}_e + \rho_i \mathbf{V}_{ion}}{\rho_e + \rho_i}$ ,

$\rho_e$ ,  $\rho_i$  — массовые плотности электронов и ионов,  $\nabla p_e$  — градиент давления электронного газа. При получении этого уравнения пренебрегали вязкостью электронного и ионного газов, силой Кориолиса, вращением Земли, силой тяжести, а также токами, обусловленными дрейфами, происходящими от неоднородности поля (градиентным и центрробежным).

Здесь мы также не рассматриваем флюктуации НГП, порождённые взаимодействием АГВ с уже существующими токовыми структурами ионосферы. Прежде всего это вызвано тем, что упомянутые ионосферные токи имеют суточную и широтную зависимости, наличие которых в исследуемых пульсациях пока не обнаружены.

Рассмотрим составляющие вектора плотности тока  $\mathbf{j}$  — составляющую, направленную вдоль вектора геомагнитного поля (продольный ток  $\mathbf{j}_{par}$ ), и составляющую, направленную ортогонально к геомагнитному полю (поперечный ток  $\mathbf{j}_{tran}$ ).

**Плотность продольного тока.** Вдоль всего пути горизонтального движения пространственно-временного цуга АГВ происходит пространственная модуляция давления и БВ-колебательные перемещения объёмов воздуха со скоростью  $\mathbf{V}$ . Упомянутые неэлектрические силы создают в квазинейтральной плазме флюкутирующий ток. Из (1) для составляющей  $\mathbf{j}_{par}$  плотности этого тока, направленной вдоль силовой линии магнитного поля, получаем более простое уравнение:

$$\frac{\partial \mathbf{j}_{par}}{\partial t} + v_e \mathbf{j}_{par} = \frac{Ne^2}{m_e} \mathbf{E} + \frac{e}{m_e c} \nabla p_{e\ par}. \quad (3)$$

Флюкутации  $\mathbf{j}_{par}$  обусловлены резонансными колебаниями воздуха и градиентом  $\nabla p_{e\ par}$ . Колебания тока в силовой трубке порождают флюкутации магнитного поля  $\mathbf{B}_{par}$ . На рис. 4, а иллюстрируется расположение векторов  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{V}_{par}$ ,  $\mathbf{j}_{par}$ ,  $\nabla p_e$ ,  $\nabla p_{e\ par}$  и  $\mathbf{B}_{par}$  для среднеширотного ИП (расположен в начале координат).

**Плотность поперечного тока.** Как очевидно, плотность тока  $\mathbf{j}$  имеет наибольшее значение на высоте  $z_m$  максимума ионизации  $N_m$ . Согласно [18, 35] продольная ось сферического волновода, в котором распространяется КМ ПИВ, расположена на высоте  $z_m$  (в течение суток эта высота изменяется в диапазоне 250...400 км), амплитуда возмущения уменьшается по экспоненциальному закону в диапазоне  $z_m \pm 80$  км. Поэтому мы предполагаем, что и амплитуда тока также уменьшается по экспоненциальному закону в указанном диапазоне высот. Этот диапазон определяется ионосферным слоем, в котором ионизация существенно не отличается от максимальных значений, наблюдаемых на высоте  $z_m$ . Объём плазмы над ИП с таким высотным масштабом далее имеется эффективным объёмом. На границах этого объёма вдоль линий равного давления плазмы, ортогонально векторам  $\nabla p_e$  и  $\mathbf{B}$  возникнет ток с плотностью  $\mathbf{j}_{tran}$ , порождающий переменный по амплитуде магнитный момент эффективного объёма. Магнитный момент, обусловленный  $\mathbf{j}_{tran}$ ,

антипараллелен вектору  $\mathbf{B}$ . Поэтому возбуждённые флюкутации магнитного поля  $\mathbf{B}_{tran}$ , являются диамагнитными: направление вектора  $\mathbf{B}_{tran}$  всегда противоположно вектору  $\mathbf{B}$ , изменяется только амплитуда флюкутаций. Вследствие этого период колебаний  $\mathbf{B}_{tran}$  в два раза меньше временного квазипериода АГВ, ведь вне зависимости от знака  $\mathbf{j}_{tran}$  дополнительное магнитное поле  $\mathbf{B}_{tran}$  всегда противоположно вектору  $\mathbf{B}$ , имеющему неизменное направление над ИП. Положения векторов  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{j}_{tran}$ ,  $\mathbf{B}_{tran}$  и  $\nabla p_e$  для среднеширотного ИП показаны на рис. 4, б.

Сила Лоренца вынуждает электроны и ионы плазмы двигаться по окружностям (в противоположных направлениях) в плоскости, ортогональной силовым линиям  $\mathbf{B}$  (см. рис. 4, б). В результате направленного перемещения вдоль силовой линии (обусловленного  $\mathbf{V}_{par}$ ) и кругового движения в плоскости, ортогональной к ней, заряженные частицы в итоге движутся по спирали. Именно круговые движения заряженных частиц вокруг силовой линии при наличии  $\nabla p_e$  и порождают поперечный ток  $\mathbf{j}_{tran}$ , ортогональный как силовой линии поля  $\mathbf{B}$  (и продольному току  $\mathbf{j}_{par}$ ), так и  $\nabla p_e$ . Согласно (2) плотность тока  $\mathbf{j}_{tran}$  описывается уравнением

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{j}_{tran}}{\partial t} + \frac{e}{m_e c} [\mathbf{j}_{tran} \cdot \mathbf{B}] + v_e \mathbf{j}_{tran} = \\ = \frac{Ne^2}{m_e} \left( \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{V}_{p_{tran}} \cdot \mathbf{B}] \right) + \frac{e}{m_e c} \nabla p_e, \end{aligned} \quad (4)$$

где вектор плотности тока  $\mathbf{j}_{tran} = Ne (\mathbf{V}_{ion\ tran} - \mathbf{V}_{e\ tran})$ ,  $\mathbf{V}_{ion\ tran}$ ,  $\mathbf{V}_{e\ tran}$  — составляющие векторов скоростей ионов и электронов, ортогональные  $\mathbf{B}$ .

В приведенном рассмотрении полагалось, что все ионы имеют одинаковую массу. Однако в дальнейших исследованиях в области максимума слоя F2 целесообразно рассмотреть наличие ионов двух разных масс: ионов кислорода  $O_1$  и азота  $N_2$ , имеющих наибольшие концентрации в упомянутом диапазоне высот.

**Влияние фоновых возмущений на достоверность выявления исследуемых пульсаций.** Под фоновыми возмущениями подразумеваются все колебания геомагнитного поля, порожденные не исследуемым источником (сторонними причинами).

Высокоширотные источники возмущений наиболее сильно проявляются на высокоширотных ИП, однако их мешающее влияние может оказаться определяющим и при измерениях, выполненных на ИП, расположенных на средних широтах. Например, мощные высыпания энергичных протонов в магнитосферные каспы Земли часто порождают на ионосферных высотах глобально наблюдаемые КМ АГВ с относительной амплитудой возмущений атмосферного давления (относительно фоновых значений), близкой к единице [35, 18]. В этом случае затруднительно выполнить корректный анализ изучаемых геомагнитных пульсаций, вызванных менее мощными источниками, даже если эти источники расположены значительно ближе к ИП.

Акустико-гравитационные волны, порожденные наземными и атмосферными взрывами, солнечным терминатором, штормами в океане, также будут вызывать рассматриваемый эффект. В результате над ИП может происходить суперпозиция АГВ, порождённых различными источниками. Это затрудняет идентификацию флюктуаций НГП, вызванных исследуемыми источниками.  $PC5$ -колебания от исследуемого возмущения могут усиливаться, ослабляться или полностью исчезать из-за влияния фоновых флюктуаций НГП. Возможно также изменение характера колебаний (вида зависимости НГП от времени), если фазы фоновых и исследуемых колебаний сдвинуты приблизительно на  $\pi/2$ , а их амплитуды имеют близкие значения.

Филигранная работа по обнаружению серий возмущений НГП выполнена в исследованиях [4, 6, 25–27, 22–24, 28, 33]. Для частичной компенсации мешающего влияния фоновых возмущений авторы выполнили также и статистический анализ результатов своих наблюдений.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, СВИДЕТЕЛЬСТВУЮЩИЕ ОБ АДЕКАВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕХАНИЗМА

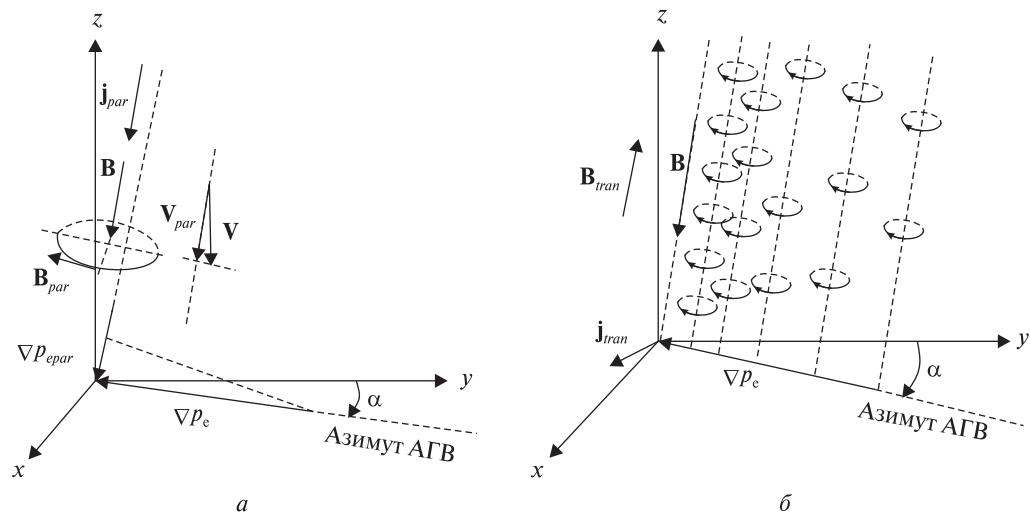
Значения периодов колебаний на регистрациях рис. 1 приблизительно одинаковы, разнятся лишь фазы флюктуаций. На всех других регистрациях, приведенных в работах [4, 6, 25–27, 22–

24, 28, 33], значения периодов пульсаций  $H$ - и  $D$ -составляющих также существенно не отличаются друг от друга. Фазы флюктуаций  $H$ - и  $D$ -составляющих отличаются друг от друга из-за суперпозиции составляющих магнитных полей  $\mathbf{B}_{par}$  и  $\mathbf{B}_{tran}$  (см. рис. 4). Заметим, что период флюктуаций  $\mathbf{B}_{tran}$  меньше временного периода АГВ [18, 35], однако он существенно больше  $T_{BV}$ . Например, при  $R = 4000$  км период флюктуаций  $\mathbf{B}_{tran}$  примерно в 2.5 раза превышает  $T_{BV}$ .

По нашей гипотезе наблюдаемые периоды в каждой серии флюктуаций обусловлены атмосферным резонансом с периодом  $T_{BV}$  в области высоты  $z_m$ . Значение периода  $T_{BV}$  в основном определяется высотой над поверхностью Земли выбранного объема воздуха [10, 37, 50].

Суточный ход  $z_m$  приводит к вариациям значений  $T_{BV}$  (на высотах  $z_m$ ) и соответствующим изменениям периодов в сериях флюктуаций. Это происходит вследствие того, что моменты появления серий, например первой и третьей, для  $R > 5000$  км могут различаться на несколько часов, что над ИП приводит к заметному изменению  $z_m$  из-за его суточного хода. Средние периоды флюктуаций каждой серии как функции от номера серии могут увеличиваться, уменьшаться, либо уменьшаться и увеличиваться (для полуденного времени).

Так, в эксперименте по изучению Витимского болида наблюдалось четыре серии. Первая серия началась приблизительно в 17:00 UT, а четвёртая — спустя пять часов (см. рис. 2, a). На ИП указанный промежуток наблюдения соответствует переходу ионосферы от вечерних к ночных условиям, в ходе которого значение  $z_m$ , и следовательно  $T_{BV}$ , в области высот  $z_m$  увеличивается. В этих, наиболее качественных измерениях, удалось зарегистрировать по пять периодов флюктуаций в каждой из четырёх серий (видимо, максимальное число периодов в серии, обусловленное добротностью атмосферы). В результате одинакового числа периодов в каждой серии и линейного возрастания периода  $T$  флюктуаций с повышением номера серии наблюдается практически линейная возрастающая зависимость длительности  $\Delta T$  серии в зависимости от её номера  $n$  (см. рис. 2, в).



**Рис. 4.** Взаимное расположение векторов, определяющих векторы плотности продольного тока  $j_{par}$  (уравнение (3), фрагмент *а*) и плотности поперечного тока  $j_{tran}$  (уравнение (4), фрагмент *б*) в ионосферной плазме над среднеширотным ИП (находится в начале координат)

На рис. 1, *д* показаны те же зависимости, что и на рис. 2, *в*, но для старта ракеты с космодрома Сичан 24 октября 2007 г. (см. рис. 1, *б*). Здесь для второй серии обнаруживается минимальное значение как длительности среднего периода флуктуаций, так и длительности самой серии. Такие нелинейные зависимости объясняются тем, что начало второй серии (12:15 UT) на ИП (местное время 14:15) соответствует минимуму  $z_m$  и  $T_{BV}$ , что является регулярным эффектом околополуденных измерений. В этом эксперименте наблюдалось более четырёх периодов в каждой серии.

Таким образом, поведение кривых среднего периода флуктуаций и длительности серии (пакета) в зависимости от номера серии объясняются с привлечением предлагаемого механизма возникновения пульсаций НГП.

**Сопоставление модельных и экспериментальных значений скоростей распространения возрастающих нулей.** Для проверки адекватности предложенного механизма возникновения геомагнитных флуктуаций сопоставим также модельные (табл. 2) и экспериментальные значения скоростей возрастающих нулей. Экспериментальные значения скоростей рассчитаны с использованием расстояния от очагов возмущения (расположенных на поверхности Земли) до ИП и времен-

ных задержек передних фронтов серий геомагнитных флуктуаций (времени обнаружения первого максимума в выбранной серии геомагнитных пульсаций) относительно моментов появления фрагментов цуга АГВ (возрастающих нулей), ответственных за возбуждение соответствующих серий НГП.

Временные задержки (относительно момента старта ракеты, взрыва болида) взяты из работ [4, 6, 25–27, 22–24, 28, 33], где анализируются возмущения, наблюдаемые после стартов наиболее тяжелых типов ракет с различных космодромов мира и падения крупного метеорита. Для метеорита при расчёте расстояния до источника возмущения (при расчёте скорости каждой серии НГП) использовались координаты наземной проекции очага возмущения (взрыв на высоте 30 км основной массы метеорита). Значения экспериментальных задержек для первых трех (четырёх для болида) серий геомагнитных флуктуаций определялись в указанных работах от момента старта ракет (взрыва болида). Для стартов ракет задержки корректировались на время достижения ракетами высоты 100...150 км. При вычислении экспериментальных задержек в упомянутых работах полагалось, что начало генерации всех трех (четырёх) серий геомагнитных возмущений соответствует одному и тому же мо-

менту времени — старту ракеты (взрыву болида). В случае возмущений, вызванных стартами ракет, определялись средние значения задержек появления каждой серии пульсаций для всех пусков одних и тех же типов ракет и космодромов. Они выявлены в результате анализа временных гистограмм-распределений задержек, полученных для всех пусков ракет каждого типа и выбранного космодрома. На этих гистограммах по оси ординат откладывалась появляемость задержки, а по оси абсцисс — ее местоположение на оси временных задержек. Появляемость задержки — это отношение числа случаев, когда наблюдалась выбранная серия колебаний, к общему числу экспериментов. Появляемость рассчитывалась для дискретного шага задержки (постоянного для каждой гистограммы), значение которого пропорционально расстоянию до космодрома. Для ракет КНР строилась интегральная гистограмма. Она рассчитывалась для всех космодромов страны, старты с которых использованы в анализе. Время задержки каждой серии определялось по наблюдаемым максимумам на гистограмме. Полагалось, что значения гистограммы вне максимумов обусловлены фоновыми флуктуациями и не имеют отношения к исследуемому возмущению. Такая методика обработки данных позволила частично уменьшить мешающее влияние фоновых возмущений. Однако погрешность определения задержки при этом увеличивается, она определяется длительностью временного шага гистограммы, изменяющейся от 3 до 30 мин, соответственно для самых близких ( $\sim 1500$  км) и наиболее удалённых ( $\sim 9500$  км) очагов возмущений.

В отличие от предположений, принятых в названных публикациях, мы полагали, что в случае возмущений пусками ракет максимумы гистограммы задержек обусловлены прохождением над ИП трёх первых возрастающих нулей цуга АГВ. Передние фронты четырёх серий колебаний, зарегистрированных после падения болида, мы связывали с четырьмя первыми возрастающими нулями, перемещающимися над ИП. Так как порождение каждого возрастающего нуля происходило с известным запаздыванием относительно onset, то приведенные в работах дли-

тельности исходных экспериментальных задержек мы уменьшали с использованием выражения (1): мы учли тот факт, что в источнике исходного возмущения возрастающие нули порождаются в разное время (рис. 3). Ещё раз отмечаем, что времена появления возрастающих нулей отсчитываются от момента onset (нулевой экстремум в табл. 1). Здесь необходимо отметить, что момент onset, видимо, имеет место спустя 3...10 мин после начала возмущения (старта ракеты, взрыва болида). Такое заключение мы делаем на основе анализа ядерных экспериментов и работы [44]. Поскольку мы не учитывали эту задержку, то полученные нами значения скоростей возрастающих нулей могут быть несколько заниженными. Влияние указанной задержки на снижение скоростей обратно пропорционально расстоянию от источника возмущения до ИП.

В табл. 3 для каждого источника возмущений приводятся его географические координаты  $\phi$  и  $\lambda$ , расстояние  $R$  до ИП, энергия возмущения  $Q$ , число событий, вызванных этим источником, а также средние относительные погрешности  $\eta$  измерений  $V_{0i}$  для трёх (для болида — четырёх) серий колебаний. В этой таблице источники перечислены по убыванию их расстояния до ИП.

На рис. 5 экспериментальные значения скоростей первых трёх (четырёх для болида) возрастающих нулей цуга АГВ, выявленные по мониторингу флуктуаций напряженности НГП, составлены с модельными [35, 18] значениями (метка Модель). Доверительные интервалы, приведенные на графиках, рассчитаны по данным [4, 6, 25—27, 22—24, 28, 33]. На наш взгляд, указанные доверительные интервалы характеризуют лишь часть неопределённостей экспериментальных значений, в большинстве случаев их следует увеличить в несколько раз. Подробнее вопрос о погрешностях обсуждается ниже. В табл. 3 для каждой панели рис. 5 приводится дополнительная информация.

С французского космодрома Куру (Французская Гвиана) в период с 5 июня 2002 г. по 14 ноября 2007 г. осуществлено 15 стартов ракеты «Ариан-5» с начальной массой 777 т. Сопоставление модельных и экспериментальных значе-

ний  $V_{0i}$  показано на панели 1 рис. 5. На панели 2 этого же рисунка представлены аналогичные данные для космодрома США Мыс Канаверал, где в период с 08.04.2002 по 31.10.2007 гг. осуществлено 11 стартов «Спейс Шаттл» с массой 2030 т. Расстояния  $R$  до этих космодромов приблизительно одинаковы и составляют соответственно около 9500 и 9400 км. Энергия возмущения «Спейс Шаттл» превышает энергию «Ариан-5» в 2.6 раза. Поэтому можно было ожидать, что средняя погрешность  $\eta$  данных для космодрома Мыс Канаверал будет существенно меньше, чем для космодрома Куру. Однако оказалось, что погрешность данных для космодрома США ( $\eta = 49.9$ ) на 11.5 % больше, чем для космодрома Франции ( $\eta = 38.4$ ). Обсудим возможную причину такого результата.

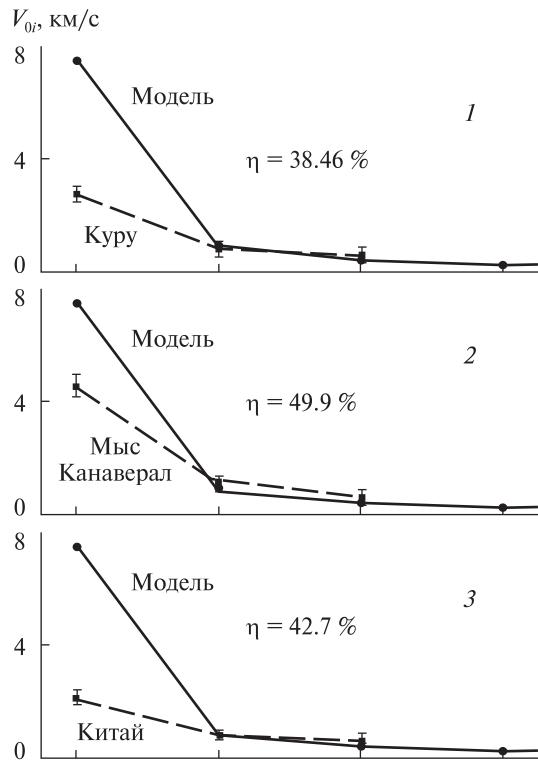
**Энергия возмущения и расстояние до источника.** Согласно модели [18, 35] амплитуда АГВ связана с энергией источников  $Q$  нелинейной возрастающей зависимостью. Наиболее ярко такая нелинейная экспериментальная зависимость проявляется в ядерных испытаниях, когда энергия  $Q$  взрыва изменяется в десятки и тысячи раз, а амплитуда возмущений на одних и тех же расстояниях от места взрыва увеличивается лишь в несколько раз. С увеличением  $R$  амплитуда АГВ, безусловно, уменьшается. Согласно [7] энергия АГВ убывает как  $R^{-1}$ , а амплитуда возмущения давления и плотности частиц в волне — как  $R^{-1/2}$ . Из-за упомянутых эффектов для  $R \sim 9500$  км (рас-

стояния ИП до космодромов Куру и Мыс Канаверал) относительная амплитуда КМ АГВ  $A_D$  (относительно фоновых значений) над ИП достаточно мала. Различие энергии возмущения не привело к существенному отличию амплитуд АГВ. Именно поэтому наблюдаются столь большие (34.8 и 49.8 %) погрешности, значения которых, скорее всего, лежат в пределах доверительных интервалов средних значений вычисленных  $\eta$ .

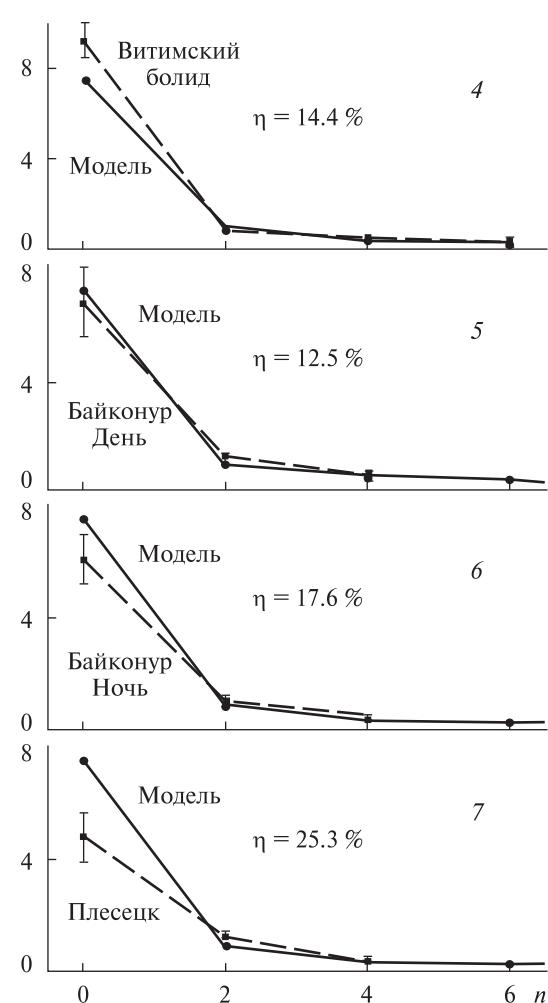
На панели 3 рис. 5 показаны модельные и экспериментальные значения  $V_{0i}$ , полученные для космодромов Китая (33 пуска ракет). Пуски ракет осуществлялись с 25 марта 2002 г. по 24 октября 2007 г. Для этих экспериментов погрешность оказалась равной 42.7 %, что достаточно близко к прежним значениям (для  $R \sim 9500$  км), однако расстояние  $R$  меньше почти в два раза — 4900...5900 км. Вместе с тем энергия возмущения составляла лишь 0.2...0.7 от энергии возмущения ракетами «Ариан-5», запущенных с космодрома Куру. Поэтому в результате уменьшения энергии возмущения и сокращения расстояния до источника амплитуда АГВ над ИП оказалась приблизительно такой же, как и при пусках с космодрома Франции. На наш взгляд, увеличение погрешности также обусловлено тем, что в этом эксперименте использовались средние расстояния до трёх космодромов (расстояния различаются на 1000 км) и ракеты разной грузоподъёмности (энергии возмущения различались примерно в три раза).

Таблица 3. Параметры возмущающих источников и погрешности измерений  $V_{0i}$

Номер	Космодром, болид	$\phi$ , град	$\lambda$ , град	$R$ , км	Число стартов, событий	$Q$ , Мт ТНТ	$\eta$ , %
1	Куру (Франция)	5.20N	52.73W	9541	15	$0.9 \cdot 10^{-4}$	34.8
2	Мыс Канаверал (США)	28.45N	80.53W	9366	11	$0.24 \cdot 10^{-3}$	49.9
3	Цеюань (Китай)	41.10N	100.3E	4889	10	$(0.2...0.6) \cdot 10^{-4}$	42.7
	Тайюань (Китай)	38.80N	111.50E	5861	12		
	Сичан (Китай)	28.10N	102.3E	5931	11		
4	Витимский болид (Россия)	58.27N	113.45W	4850	1	0.2	14.4
5	Байконур (Россия)	45.63N	63.26E	2010	65	$(0.4...0.8) \cdot 10^{-4}$	12.5 (день) 17.7 (ночь)
6	Плесецк (Россия)	62.70N	40.35E	1468	21	$0.4 \cdot 10^{-4}$	25.3



**Рис. 5.** Экспериментальные значения  $V_{0i}$  скоростей первых трех (четырех для болида) возрастающих нулей цуга АГВ и их модельные значения для различных космодромов мира;  $\eta$  — средняя погрешность экспериментальных значений  $V_{0i}$



Результаты сравнения модельных и экспериментальных значений скоростей  $V_{0i}$  для Витимского болида показаны на панели 4 рис. 5. В этом эксперименте погрешность уменьшилась до 14.4 %. Уменьшение погрешности в 2.4...3.5 раз обусловлено тем, что высвободившаяся эквивалентная энергия взрыва (0.2 Мт ТНТ) в 830 раз превышала энергию возмущения запусками «Спейс Шаттл» и в 5000 раз превосходила энергию возмущения запусками китайских ракет. При этом следует принять во внимание, что расстояние до места взрыва Витимского болида в два раза меньше, чем расстояние до Мыса Канаверал, и сравнимо с расстоянием до космодромов Китая. Эти результаты подтверждают нелинейную связь  $Q$  и  $A_D$ , ведь погрешность уменьшилась лишь в не-

сколько раз, а энергия возмущения фактически увеличилась в 830...5000 раз.

Большая мощность взрыва болида позволила зарегистрировать не три, как во всех других экспериментах, а четыре серии колебаний. Такой эффект обсуждался выше. Сейчас лишь ещё раз подчеркнём, что увеличение числа наблюдаемых серий флюктуаций НГП с увеличением  $Q$  свидетельствует в пользу справедливости привлечения акустико-гравитационных волн для объяснения природы исследуемых пульсаций.

На панелях 1—4 рис. 5 четко прослеживается уменьшение погрешности определения скорости возрастающих нулей с увеличением их номера. Модельные значения этой скорости для первых трёх возрастающих нулей равны 7.5, 0.85 и 0.4 км/с.

Уменьшение последних двух значений скорости в 9...19 раз при постоянной дискретности временных интервалов в ракетных экспериментах, приводит к существенно меньшим погрешностям экспериментальных значений. При повышении числа усреднений и уменьшении  $R$  погрешности определения скоростей  $V_{01,02,03}$  и средняя погрешность  $\eta$  должны уменьшиться. Это предположение подтверждается данными для 65 стартов с космодрома Байконур ( $R \approx 2000$  км) и 21 старта с космодрома Плесецк ( $R \approx 1500$  км), для которых погрешность составляет 13...25 % (см. панели 5—7 рис. 5 и табл. 3). Энергии возмущений для обоих космодромов достаточно близкие. Рассмотренная динамика уменьшения погрешности с увеличением номера серии колебаний говорит в пользу рассматриваемой гипотезы.

**Дневные и ночные условия.** Графики для космодрома Байконур показаны отдельно для дневных и ночных стартов (панели 5 и 6 на рис. 5). Днем и ночью значения  $\eta$  соответственно равны 12.5 и 17.7 %. Рост погрешности ночных измерений является вполне ожидаемым результатом, поскольку ночью концентрация  $N_m$ , и следовательно, ток в квазинейтральной гиротропной ионосферной плазме, на порядок меньше, чем днем. По этой же причине днём первая серия наблюдалась практически всегда, а ночью — приблизительно в 50 % случаев [26]. Погрешность определения скорости первой серии обусловлена как шагом дискретизации гистограммы, так и тем, что флуктуации первой серии имели шумо-подобный характер, близкий к фоновым колебаниям [23, 24, 28, 33]. Согласно нашим предположениям трудности регистрации первой серии вызваны тем обстоятельством, что амплитуда нулевого экстремума АГВ (*onset*) является наименьшей среди последующих десяти экстремумов АГВ (см. табл. 1 и рис. 3), в результате продольный и поперечный токи, возбуждаемые начальным возрастающим нулем, значительно меньше токов, инициируемых двумя последующими возрастающими нулями.

На панели 7 рис. 5 показаны результаты для космодрома Плесецк. Для этого, самого близкого к ИП космодрома, значение  $\eta = 25.3\%$ , днём первая серия БВ-колебаний появлялась в 86 %

случаев, ночью — отсутствовала [26]. Вместе с тем дажеочные значения  $\eta$  для Байконура были меньше (17.7 %). Этот на первый взгляд неожиданный эффект мы объясняем тем, что в Плесецке часто запускались ракеты с энергией возмущения, в два раза меньшей, чем на космодроме Байконур, поэтому при различии  $R$  всего лишь в 500 км уменьшение  $Q$  в два раза привело к уменьшению амплитуды крупномасштабных АГВ и увеличению  $\eta$ .

**Динамика погрешности.** В целом высокая погрешность данных на панелях 1—4 вызвана погрешностью измерений задержки появления переднего фронта первой серии колебаний НГП, обусловленной высокой скоростью первого возрастающего нуля цуга АГВ и малой амплитудой *onset*. Снижение погрешности от 50 до 13 % при уменьшении  $R$  от 9500 до 2000 км при обработке только дневных экспериментов дополнительно свидетельствует о достоверности модельных значений  $V_{0i}$  и правильности привлечения АГВ в качестве основного источника наблюдаемых пульсаций. При этом заметим, что эксперименты выполнены в 2002—2007 гг. в разные сезоны года при высокой, средней и низкой солнечной активности, при разных уровнях магнитной активности. Все это оправдывает предположение [18, 35] о том, что в моделях  $V_i$ ,  $V_{0i}$  суточными зависимостями и перечисленными факторами в первом приближении можно пренебречь. Приведенные экспериментальные факты подтверждают адекватность предложенного нами механизма генерации геомагнитных флуктуаций.

**Пространственная зависимость задержек появления серий Рс5-пульсаций. Скорости возрастающих нулей.** С целью выявления пространственной зависимости задержек появления серий пульсаций воспользуемся экспериментальными значениями задержек для космодромов с различными значениями  $R$  [5]. Скорректируем их с учетом времени появления каждого возрастающего нуля. Графики пространственных зависимостей задержек появления над ИП трех серий колебаний НГП иллюстрирует рис. 6, а. Здесь экспериментальные значения задержек для каждой из трех серий отмечены маркерами разного вида, а прямыми линиями показаны линейные регрес-

ции экспериментальных значений. Значения скоростей первых трех возрастающих нулей показаны над графиками регрессий, по которым они рассчитаны. Сравнение модельных и экспериментальных значений  $V_{0i}$  приводится на рис. 6, б. Погрешность этих данных составляет 58.7 %. Результаты анализа данных свидетельствуют о том, что скорости возрастающих нулей (а следовательно, и других фрагментов цуга с одинаковыми фазами) не изменяются при распространении АГВ на расстояния вплоть до 9500 км. Аналогичные результаты получены для АГВ, порожденных ядерными взрывами и извержениями вулканов [18, 35]. Поэтому неизменность скоростей  $V_{0i}$  от расстояния до источника возмущений еще раз подтверждает, что природа пульсаций НГП связана с распространением АГВ. Ведь постоянство скоростей фрагментов цуга при произвольных его расстояниях до источника присуще только АГВ.

**Время прихода серий колебаний к измерительным пунктам и погрешности его определения при исследовании Витимского болида.** Этот эксперимент является наиболее качественным, поскольку выполнен при наибольшей энергии возмущения. Используем его для вычисления минимальной погрешности определения времени прихода серий колебаний к ИП. Как отмечалось выше, первая, вторая, третья и четвертая серии колебаний начинаются над ИП после прихода первых четырех возрастающих нулей. Они соответствуют нулям с номерами 0, 2, 4 и 6. Зарождаются указанные фрагменты цуга АГВ с задержками относительно onset, значения которых определяются выражением (1). Эти задержки и скорости распространения нулей цуга (см. табл. 2) позволяют вычислить время появления каждой серии колебаний над ИП. В табл. 4 приведены абсолютные и относительные погрешности определения экспериментальных значений времени прихода, а также модельные значения задержек и скорости распространения возрастающих нулей цуга. Как видно, время появления четвертой серии колебаний имеет расчётную задержку 5.6 ч и абсолютную погрешность её определения 38 мин. При этом относительная погрешность задержки составляет 11 %. Первая серия при расчёте задержки появления 12.6 мин имеет аб-

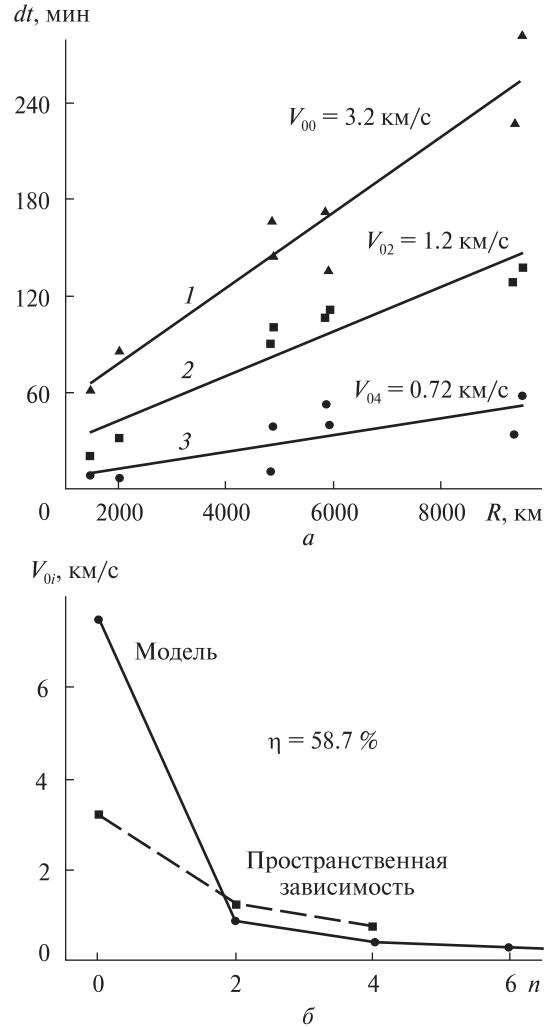


Рис. 6. а — зависимость задержек  $dt$  появления над ИП трех серий БВ-колебаний (возрастающих нулей) от расстояния  $R$  до космодромов. Прямые линии — линейные регрессии. Экспериментальные значения скоростей первых трех возрастающих нулей ( $V_{00}$ ,  $V_{02}$ ,  $V_{04}$ ) показаны над графиками; б — модельные и экспериментальные значения  $V_{0i}$

солютную и относительную погрешности соответственно 1.5 мин и 12 %.

Увеличение абсолютной погрешности с увеличением номера серии (см. табл. 4) мы объясняем не только увеличением длительности задержки (с 12.6 мин для первой серии до 5.6 ч — для четвертой), но и влиянием ветра на всем протяжении трассы распространения АГВ (~ 5000 км). Например, при наиболее вероятной скорости

ветра в 0.05 км/с (на высоте  $z_m$ ) [1] наибольшее влияние ветер будет оказывать на время прихода двух последних серий, скорости которых соизмеримы со скоростью ветра (см. вторую графу в табл. 4). Скорость  $V_{00}$  существенно превышает вероятную скорость ветра, находящуюся в диапазоне 0.04...0.08 км/с (на высоте  $z_m$ ) [1]. Если указанную скорость ветра учесть при расчете модельных значений, то для третьей и четвертой серий колебаний погрешность определения времени прихода уменьшается приблизительно в три раза (см. табл. 4). Такой результат подтверждает важность учёта ветра при вычислении времени прихода серий колебаний.

**Рост временного периода в цуге акустико-гравитационных волн.** Экспериментальные данные, полученные для космодромов Байконур и Плесецк, использованы для расчета зависимости длительности временного периода АГВ ( $T$ ) от времени распространения фрагментов цуга ( $t$ ) при фиксированных удалениях ИП от источника возмущений. Время наблюдения середин первых двух временных периодов АГВ определялось как среднее значение времени прихода смежных возрастающих нулей. Длительность этих периодов является разностью времен прихода смежных возрастающих нулей цуги АГВ. Скорости распространения волн, возбуждаемых минимальными фрагментами цуга (на рис. 3 это точки графика), не изменяются с изменением расстояния от источника до ИП и уменьшаются с удалением фрагмента от переднего фронта АГВ [18, 35]. Поэтому зависимость  $T(t)$  должна быть возрастающей.

На рис. 7 сравниваются экспериментальные и модельные зависимости  $T(t)$  для  $R = 1500$  км (Плесецк) и  $R = 2000$  км (Байконур). Здесь модельные возрастающие зависимости соответственно для  $t > 2.5$  и  $t > 3.5$  ч обусловлены прохождением над ИП низкоскоростных среднемасштабных АГВ, порождённых экстремумами цуга с номерами более шести [18, 35]. Модельные кривые с  $t > 1.5$  ч относятся к высокоскоростным КМ АГВ, порождающим рассматриваемые пульсации. Как видно, экспериментальные и модельные кривые качественно согласуются друг с другом, расхождение кривых с течением времени мы объясняем погрешностью экспериментальных данных.

Еще раз напомним, что в ходе зарождения цуги АГВ все его периоды равны между собой ( $T = 2\tau_0$ ). Обнаруженное увеличение  $T$  при движении цуги подтверждает, что скорости распространения фрагментов цуги имеют отличающиеся значения, и что скорости не изменяются с изменением расстояния до источника исходного возмущения.

**О чём свидетельствует линейное увеличение продолжительности и периода колебаний первых трёх серий возмущений с увеличением расстояния до космодрома.** В работе [5] по всему объёму данных установлено, что с увеличением  $R$  средние значения продолжительности  $\Delta T$  и периода  $T$  каждой из трёх серий возмущений возрастают по почти линейному закону. Однако такой рост линейной регрессии наблюдается лишь в интервале ее доверительных значений, поэтому может

Таблица 4. Времена прихода серий колебаний и погрешности их определения для Витимского болида

Параметр	Номер серии			
	1	2	3	4
Скорость движения возрастающих нулей, км/с	7.5	0.854	0.4041	0.2593
Расчётная задержка, ч	0.21	1.74	3.63	5.62
Разность расчётной и экспериментальной задержек, мин	-1.47	1.64	34.19	38.27
Относительная погрешность без учёта ветра, %	-11.54	1.57	15.7	11.34
Разность расчётной и экспериментальной задержек с учётом ветра, мин	-1.54	-3.59	-12.17	-12.12
Относительная погрешность с учётом ветра, %	-12.1	-3.62	6.22	-4.22

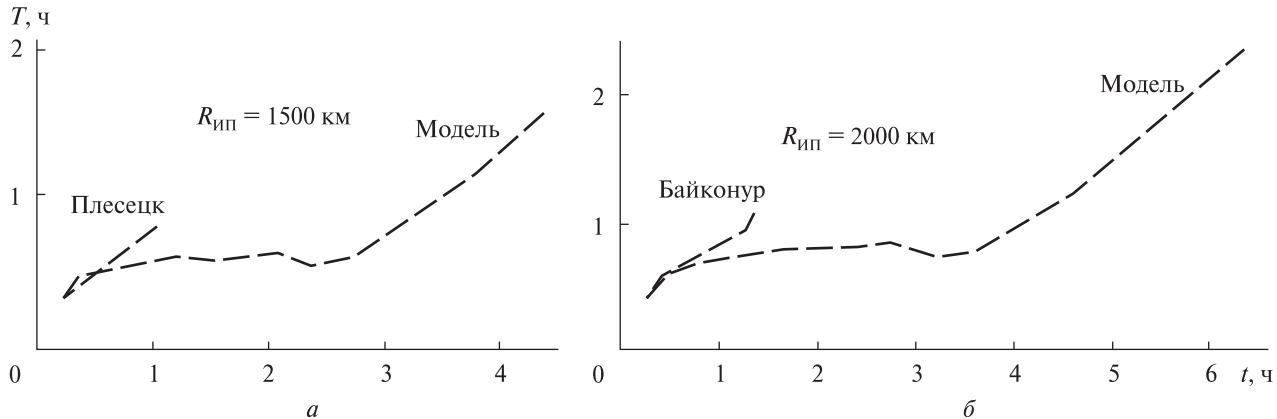


Рис. 7. Экспериментальные и модельные зависимости временного периода  $T$  от времени  $t$  распространения АГВ для  $R = 1500 \text{ км}$  (Плесецк) и  $R = 2000 \text{ км}$  (Байконур)

быть недостоверным. Напоминаем, с учетом погрешности измерений разброс их значений соответствует диапазону периодов  $T_{BV}$  на высотах F2-области ионосферы. Предположим, что упомянутый линейный рост зависимостей  $\Delta T(R)$  и  $T(R)$  всё же достоверен. Выясним возможную причину такого роста. Как отмечалось выше, число колебаний в каждой серии не более пяти, а период колебаний определяется периодом  $T_{BV}$ , наблюдаемым в области  $z_m$ . Таким образом, для каждого выбранного  $R$  значение  $\Delta T$  не превосходит  $\sim T_{BV}$ . Поэтому  $\Delta T$  и  $T$  фактически определяются значениями  $T_{BV}$  на высотах  $z_m$ , возрастающими при переходе от дня к ночи. Можно предположить, что в большинстве случаев изменения на ИП для близких космодромов (Плесецк, Байконур) проводились ближе к дневному времени, а на более дальних (Китайские космодромы, Мыс Канаверал, Куру) — ближе к ночнойму времени и в ночное время. Время наблюдения для всего массива данных не приводится, поэтому проверить высказанное предположение не представляется возможным.

**Обнаруженные пульсации напряженности геомагнитного поля обусловлены крупномасштабными акустико-гравитационными волнами.** Оценим горизонтальный масштаб АГВ для  $R = 4850 \text{ км}$  (расстояние от места падения Витимского болида до ИП). Выбранное расстояние — приблизительно середина диапазона удалений до использованных источников исходного возмущения. Гори-

зонтальный пространственный масштаб волны над ИП оценивался по разностям между временами наблюдения первой и второй, второй и третьей, третьей и четвёртой серий магнитных флюктуаций и скоростям распространения возмущения соответствующих фрагментов цуга АГВ (полученных с учётом задержек момента генерации фрагмента относительно onset в очаге возмущения). Для ИП с упомянутым расстоянием до источника согласно модельным расчётом оказалось, что для первой и второй серий горизонтальный период  $L > 12000 \text{ км}$ , для второй и третьей серий  $L > 3000 \text{ км}$ .

Такие значения  $L$  относятся к КМ АГВ. Для  $R = 9500 \text{ км}$  (расстояние до космодрома Куру и Мыс Канаверал) приведенные значения пространственного периода становятся ещё больше (увеличиваются в  $9500/4850 = 1.96$  раз). Для  $R = 1500 \text{ км}$  упомянутые выше значения  $L$  уменьшаются в  $1500/4850 = 0.31$  раз, однако значения  $L$  для первой и второй, второй и третьей серий составляют 3800 и 1000 км соответственно. Эти значения  $L$  также относятся к КМ АГВ. Поэтому мы заключаем, что все наблюдаемые в экспериментальных исследованиях пульсации НГП порождены только КМ АГВ. Согласно теоретическим исследованиям [3, 8, 10] КМ АГВ фактически являются чисто поперечными волнами, распространяющимися вдоль поверхности Земли, и в которых колебания вдоль местной вертикали порождены силами тяжести и всплытия.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Самые ранние наблюдения вариаций НГП, порождённые стартами ракет с космодрома Байконур, опубликованы в работе [17]. Они получены в 1999 — 2001 гг. предположительно для запусков ракет типа «Союз» и «Протон». В этих исследованиях наблюдались короткопериодические (с периодом около 3...13 мин) и длиннопериодические (140 мин) флуктуации НГП. Они обнаруживались соответственно спустя 2...4 мин и 10...15 мин после стартов ракет. Расстояния между ИП и космодромом равнялось 1040 км, между ИП и ближайшим активным участком траектории ракет — около 800 км. Скорости передних фронтов короткопериодических и длиннопериодических флуктуаций по нашим оценкам составляли соответственно 4.3...8.7 км/с и 1.2...1.7 км/с. В этих экспериментах последовательности серий колебаний с частотой БВ не были обнаружены. Поэтому мы полагаем, что наблюдаемые эффекты могли быть обусловлены иными механизмами порождения возмущений. Размах возмущений для периодов 3...13 мин составлял до 20 нТл, что существенно больше размаха вариаций, обусловленных флуктуациями с частотой БВ, для которых амплитуда обычно составляет несколько нанотесла (редко 10...15 нТл). Мы считаем, что в экспериментах [17] возможные флуктуации с частотой БВ могли быть незамеченными на фоне вариаций со значительно большими амплитудами.

С целью дополнительной проверки адекватности предложенного механизма рассмотрим суперпозицию составляющих полей  $\mathbf{B}_{par}$  и  $\mathbf{B}_{tran}$ . При наличии только колебаний поперечного тока будут наблюдаться лишь флуктуации  $H$ -компонента с периодом, в 2.5 раза превышающим период  $T_{BV}$ . В эксперименте же всегда наблюдаются флуктуации обоих компонентов, что исключает наличие только поперечного тока. Вместе с тем, если есть лишь вариации продольного тока, то должны обнаруживаться *синфазные* осцилляции обоих горизонтальных компонентов геомагнитного поля. Однако, как показал наш анализ, экспериментальные флуктуации горизонтальных компонентов геомагнитного поля,

как правило, не являются синфазными. Мы объясняем это следующей причиной.  $H$ -компонент представляет собой суперпозицию расположенных в плоскости магнитного меридиана составляющих полей  $\mathbf{B}_{par}$  и  $\mathbf{B}_{tran}$ . Поля  $\mathbf{B}_{par}$  и  $\mathbf{B}_{tran}$  имеют разные периоды колебаний, что нарушает синфазность результирующих флуктуаций с флуктуациями  $\mathbf{B}_{par}$ .  $D$ -компонент определяется практически только вектором  $\mathbf{B}_{par}$ . Таким образом, только одновременное существование  $\mathbf{j}_{par}$  и  $\mathbf{j}_{tran}$ , позволяет объяснить наличие флуктуаций  $H$ - и  $D$ -компонентов и отсутствие их синфазности.

**Как повысить надёжность экспериментальных результатов.** Погрешность определения экспериментальной зависимости  $V_{0i}(i)$  можно существенно уменьшить (что особенно важно для  $i = 0$ ), если при анализе регистраций временных вариаций геомагнитного поля ограничиться лишь надежно регистрируемыми сериями пульсаций. Если по перечисленным выше причинам сложно выявить ту или иную серию флуктуаций, то этот фрагмент регистрации следует игнорировать.

**Применение пульсаций напряженности геомагнитного поля для наземной диагностики параметров акусто-гравитационных волн.** Ранее диагностика АГВ наземными средствами выполнялась только по характеристикам ПИВ, порождаемых в ходе распространения АГВ на ионосферных высотах. Параметры ПИВ определялись по измерениям ионозондов, с использованием трансионосферного зондирования низко- и среднеорбитальных ИСЗ и др. Однако ПИВ наиболее эффективно проявляются только в тех регионах, где направление распространения АГВ составляет угол с плоскостью геомагнитного меридиана не более  $\Phi_{IP} = 20...30^\circ$  [18, 35]. Это препятствует изучению свойств АГВ по всем азимутам их распространения. Вместе с тем пульсации НГП генерируются при *любом* направлении прихода АГВ на ИП: их проявление слабо зависит от угла между плоскостью магнитного меридиана и азимутом распространения АГВ. Даже при колебаниях воздуха в АГВ ортогонально магнитному полю будут наблюдаться пульсации  $D$ -компонента.

Поэтому флуктуации НГП возможно использовать для диагностики параметров АГВ по всем

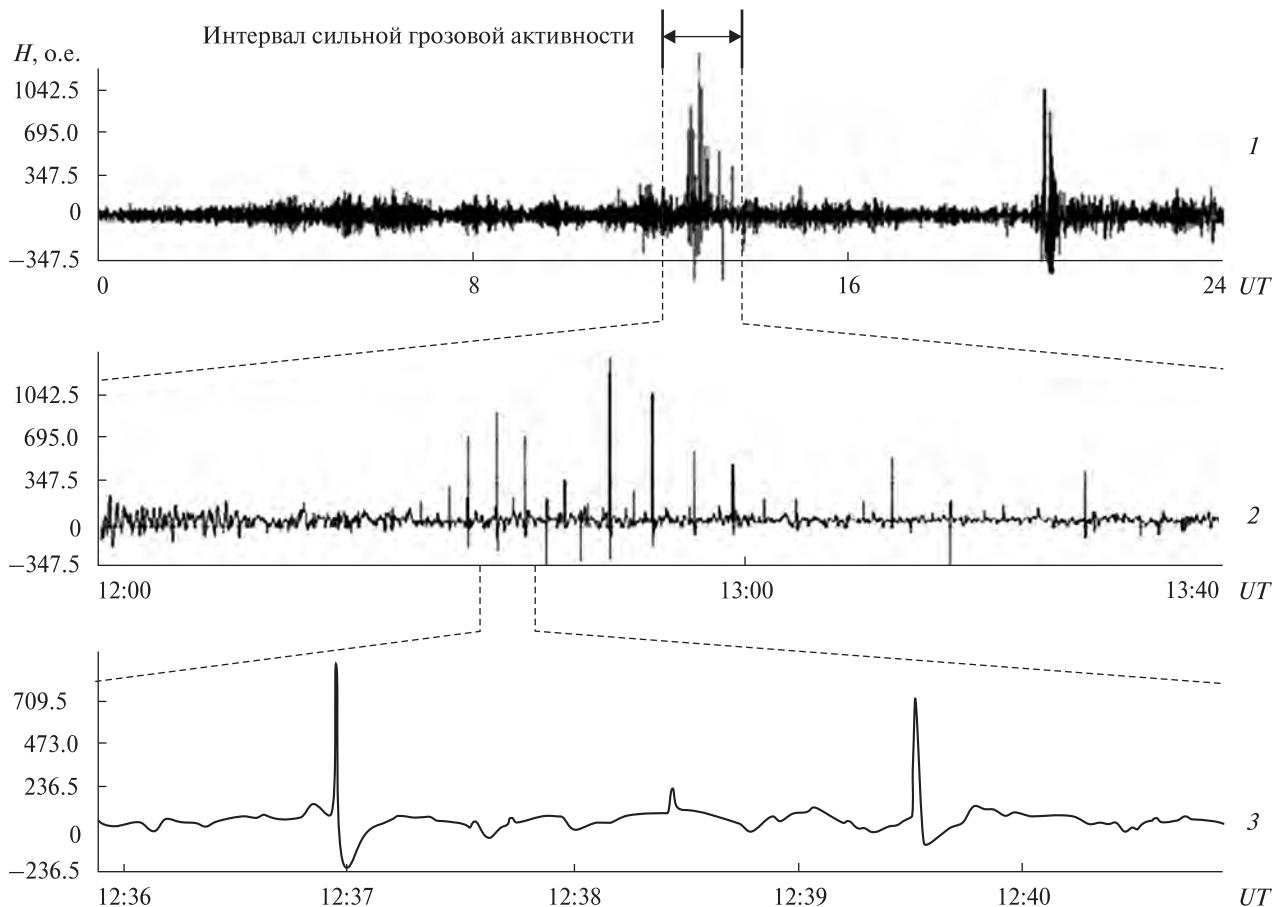


Рис. 8. Пример суточной наземной регистрации  $H$ -компоненты геомагнитного поля с интервалом сильной грозовой активности (панель 1) и фрагменты этого интервала с большим временным разрешением (панели 2 и 3)

направлениям (азимутам) их распространения от источника (повсеместно). Есть принципиальная возможность определения местоположения источника АГВ по регистрациям флуктуаций НГП при измерении горизонтальных составляющих в трёх разнесенных ИП или по изменению направления вектора геомагнитного поля в одном ИП. Эта возможность может оказаться вос требованной, например, в глобальной системе контроля ядерных взрывов.

**Мощные токи в нейтральной атмосфере не порождают пульсации напряженности геомагнитного поля.** Мы установили, что токи молниевых разрядов в нейтральной приповерхностной атмосфере не приводят к флуктуациям геомагнитного поля с периодом  $T_{BV}$ . При этом амплитуда таких токов более чем на несколько порядков

превышает амплитуды рассмотренных выше продольного и поперечного токов в ионосфере. На рис. 8 показан пример суточной наземной регистрации  $H$ -компонента геомагнитного поля с интервалом сильной грозовой активности (панель 1) и фрагменты этого интервала с большей временной разрешающей способностью (панели 2 и 3). Как видно, формы возмущений от различных разрядов молний подобны (см. панель 3), однако ни один из разрядов не порождает упомянутые выше серии колебаний геомагнитного поля с периодом  $T_{BV}$  (см. панели 2 и 3). Это заключение ещё раз подтверждает нашу гипотезу о том, что наблюдаемые серии колебаний генерируются возмущениями, вызванными распространением АГВ на ионосферных высотах, а не в нейтральной атмосфере.

В результате проведенного исследования можно заключить, что после удаленных локальных энерговыделений параметры наблюдаемых на ИП флюктуаций НГП удовлетворительно объясняются предложенной в настоящей работе моделью проявления нового физического явления. Вместе с тем эта модель нуждается в дальнейшем совершенствовании, поскольку отдельные экспериментальные эффекты ею не объясняются.

## ВЫВОДЫ

Акустико-гравитационная волна возбуждает над измерительным пунктом на ионосферных высотах серии флюктуаций напряженности геомагнитного поля. Разработана модель генерации магнитных флюктуаций, приводятся экспериментальные данные, подтверждающие адекватность этой модели. Использование модели позволяет по наземным измерениям напряженности геомагнитного поля осуществлять диагностику параметров акустико-гравитационных волн для всех направлений их распространения от источника генерации.

*Автор благодарен К. П. Гармашу за разработанную им программу просмотра регистраций магнитных пульсаций, консультации по работе магнитометра-флюксметра и проведенные многолетние измерения геомагнитных флюктуаций. Выражаю признательность С. Г. Леусу за разработку аппаратуры и проведение многолетних измерений, проф. Л. Ф. Черногору, М. А. Шамоте за изучение нового физического явления, В. Л. Дорохову за настойчивую критику и активное участие в формировании гипотезы, и проработке отдельных элементов механизма возникновения пульсаций геомагнитного поля, как следствия распространения АГВ.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. — М.: Наука, 1972. — 563 с.
2. Афраймович Э. Л., Едмский И. К., Войков С. В. и др. Перемещающиеся волновые пакеты, генерируемые солнечным терминатором в верхней атмосфере // Оптика атмосферы и океана. — 2009. — 22, № 8. — С. 753–759
3. Брюнелли Б. Е., Намгалаძэ А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 528 с.
4. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Вариации геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет и полетам космических аппаратов // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 6. — С. 87–98.
5. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с различных космодромов мира // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 1. — С. 31–43.
6. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Статистические характеристики флюктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — 8, № 2. — С. 163–180.
7. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. — М.: Наука, 1974. — 256 с.
8. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978. — 532 с.
9. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. ВУЗов. Радиофизика. — 1999. — 1. — С. 3–25.
10. Данилов А. Д., Казимировский Э. Я., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 271 с.
11. Клейменова Н. Г. Геомагнитные пульсации // Модель Космоса. — М.: МГУ, 2007. — Т. 1. — С. 611–626.
12. Куницын В. Е., Сураев С. Н., Ахмедов Р. Р. Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. — 2007. — № 2. — С. 59–63.
13. Лизунов Г. В., Леонтьев А. Ю., Скороход Т. В. Изучение динамики ионосферы в проекте «Ионосфера-Микро» // Космический проект «Ионосфера-Микро». — Киев: Академпериодика, 2013. — С. 26–45.
14. Лизунов Г. В., Скороход Т. В. Планетарное распределение среднемасштабных атмосферных гравитационных волн по данным спутниковых измерений // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 1. — С. 40–45.
15. Пудовкин М. И., Распопов О. М., Клейменова Н. Т. Возмущение электромагнитного поля Земли. — Л.: Ленинградский ун-т, 1976. — 271 с.
16. Самсонов С. Н., Плотников И. Я., Сайбек Д. Г., Ватерман Ю. Связь параметров солнечного ветра с высоколатитными магнитными пульсациями // Космічна наука і технологія. — 2006. — 12, № 1. — С. 80–84.
17. Соколова О. И., Краснов В. М., Николаевский Н. Ф. Изменения геомагнитного поля под влиянием запусков ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — 43, № 4. — С. 561–565.
18. Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Дорохов В. Л. Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений // Космічна наука і технологія. — 2016. — 22, № 5. — С. 3–70.

19. Федоренко А. К. Определение периода акустико-гравитационных волн на основе прямых спутниковых измерений // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 6. — С. 24—32.
20. Федоренко Ю. П. Ответ на комментарий Г. В. Лизунова по статье «Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений»// Космічна наука і технологія. — 2017. — **23**, № 2. — С. 52—67.
21. Федоренко Ю. П., Федоренко В. Н., Дорохов В. Л. Определение параметров крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений при помощи радиопросвещивания ионосферы сигналами низкоорбитальных навигационных ИСЗ // Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка. — 2012. — № 1010, вип. 20. — С. 97—112.
22. Черногор Л. Ф. Колебания электромагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2012. — **51**, № 1. — С. 119—132.
23. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. — Харьков: Харьков. нац. ун-т, 2009. — 382 с.
24. Черногор Л. Ф. Флуктуации геомагнитного поля вблизи г. Харькова, сопровождавшие старты ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия. — 2009. — **49**, № 3. — С. 403—415.
25. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 3. — С. 29—38.
26. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации поля, сопутствующие стартам с космодромов КНР // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 4. — С. 92—99.
27. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов Мыс Канаверал и Куру // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 6. — С. 89—98.
28. Шамота М. А. Магнитометрический мониторинг высокoenергетических процессов в геокосмосе: Дис. канд. физ.-мат. наук. — Харьков, 2011. — 153 с.
29. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и со-пряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. — 2004. — **9**, № 2. — С. 130—151.
30. Abdu M. A., Bhattacharyya A., Pancheva D., (Editors) Aeronomy of the Earth's atmosphere and ionosphere. — London, New York: Springer, 2011. — 480 p.
31. Beynon W. J. G. Evidence of horizontal motion in region F2 ionization // Nature. — 1948. — **162**, N 4127. — P. 887.
32. Cai H. T., Yin F., Ma S. Y., McCrea I. W. Observations of AGW/TID propagation across the polar cap: a case study // Ann. geophys. — 2011. — **29**. — P. 1355—1363.
33. Chernogor L. F., Blaunstein H. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-earth environment. — London, New York: CRC Press Taylor & Francis Group. Roca Roton, 2014. — 542 p.
34. Fedorenko A. K., Bespalova A. V., Cheremnykh O. K., Kryuchkov E. I. A dominant acoustic-gravity mode in the polar thermosphere // Ann. geophys. — 2015. — **33**. — P. 101—108. — www.ann-geophys.net/33/101/2015/doi:10.5194/angeo-33-101-2015.
35. Fedorenko Yu. P., Tyrnov O. F., Fedorenko V. N., Dorohov V. L. Model of traveling ionospheric disturbances // J. Space Weather Space Clim. — 2013. — **3**, A30. — P. 1—28. — doi: 10.1051/swsc/2013052.
36. Francis S. H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances // J. Geophys. Res. — 1974. — **79**, N 34. — P. 5245—5260.
37. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: A review // J. Atmos. and Terr. Phys. — 1975. — **37**, N 6—7. — P. 1011—1054.
38. Godin O. A., Zabotin N. A., Bullett T. W. Acoustic-gravity waves in the atmosphere generated by infragravity waves in the ocean // Earth, Planets and Space. — 2015. — 67:47. — doi:10.1186/s40623-015-0212-4.
39. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. — 1960. — **38**. — P. 1441—1481.
40. Hocke K., Schlegel K. A. Review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982—1995 // Ann. geophys. — 1996. — **14**. — P. 917—940.
41. Hunsucker R. D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review // Revs Geophys. and Space Phys. — 1982. — **20**, N 2. — P. 293—315.
42. Jacobs J. A., Kato Y., Matsushita S., Troitskaya V. A. Classification of geomagnetic micropulsations // J. Geophys. Res. — 1964. — 69. — P. 180—181.
43. Liu C. H., Yeh K. C. Exciting of acoustic-gravity waves in an isothermal atmosphere // Tellus. — 1971. — **23**. — P. 150—163.
44. Martyn D. F. Cellular atmospheric waves in the ionosphere and troposphere // Proc. Roy. Soc. — 1950. — A201. — P. 216—234.
45. Munro G. H. Short-period changes in the F region of the ionosphere // Nature. — 1948. — **162**, N 4127. — P. 886—887.
46. Nielson D. L. The effects of nuclear-burst-produced acoustic gravity waves on HF communication systems // Effects of atmospheric acoustic gravity waves on electromagnetic wave propagation (NATO AGARD Conf. Proc.). — 1972. — **115**. — P. 509—512.
47. Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., et al. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth, Planets and Space. — 2011. — **63**. — P. 1—11.
48. Row R. V. Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere due to a nuclear detonation and an earthquake // J. Geophys. Res. — 1967. — **72**, N 5. — P. 1599—1610.

49. Welles H. W., Watts J. M., George D. E. Detection of rapidly moving ionospheric clouds // Phys. Rev. — 1946. — **69**. — P. 540—541.
50. Yeh K. C., Liu C. H. Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere // Revs Geophys. and Space Phys. — 1974. — **12**, N 2. — P. 193—216.

*Стаття надійшла до редакції 15.12.16*

## REFERENCES

1. Abdu M. A., Bhattacharyya A., Pancheva D. (Editors). Aeronomy of the Earth's atmosphere and ionosphere, 480 p. (Springer, New York, London, 2011).
2. Afraimovich E. L., Edsmsky I. K., Voeikov S. V., et al. Travelling Wave Packets Generated by Solar Terminator in Upper Atmosphere. *Optika atmosfery i okeana*, **22** (N 8), 753—759 (2009) [in Russian].
3. Alpert Y. L. Propagation of EM waves and the Ionosphere, 563 p. (Nauka, Moscow, 1972) [in Russian].
4. Beynon W. J. G. Evidence of Horizontal Motion in Region F2 Ionization. *Nature*, **162** (N 4127), 887 (1948).
5. Bryunelli B. Ye., Namgaladze A. A. Physics of Ionosphere, 528 p. (Nauka, Moscow, 1988) [in Russian].
6. Cai H. T., Yin F., Ma S. Y., McCrea I. W. Observations of AGW/TID Propagation Across the Polar Cap: a Case Study. *Ann. Geophys.*, **29**, 1355—1363 (2011).
7. Chernogor L. F., Blaunstein H. Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment, 542 p. (New York: CRC Press Taylor & Francis Group. Roca Roton, London, 2014).
8. Chernogor L. F. Fluctuations of the Electromagnetic Field Caused by the Span of the Vitim Bolide on September 24, 2002. *Geomagnetizm i aeronomiya*, **51** (N 1), 119—132 (2012) [in Russian].
9. Chernogor L. F. Fluctuations of the Geomagnetic Field Near the City of Kharkov Accompanying Missile Launches From the Baikonur Cosmodrome. *Geomagnetizm i aeronomiya*, **49** (N 3), 403—415 (2009) [in Russian].
10. Chernogor L. F. Radiophysical and Geomagnetic Effects of Missile Launches, 382 p. (Khar'kovskiy natsional'nyy universitet, Khar'kov, 2009) [in Russian].
11. Chernogor L. F., Shamota M. A. Geomagnetic Pulsations Accompanying Missile Launches From Cape Canaveral and Kourou Cosmodromes. *Kosm. nauka tekhnol.*, **14** (N 6), 89—98 (2008) [in Russian].
12. Chernogor L. F., Shamota M. A. Geomagnetic Pulsations of the Field Accompanying the Launches From the Cosmodromes of the PRC. *Kosm. nauka tekhnol.*, **14** (N 4), 92—99 (2008) [in Russian].
13. Chernogor L. F., Shamota M. A. Wave Perturbations of the Geomagnetic Field Accompanying the Launches of Rockets From the Plesetsk Cosmodrome. *Kosm. nauka tekhnol.*, **14** (N 3), 29—38 (2008) [in Russian].
14. Danilov A. D., Kazimirovskii E. J., Vergasova G. V., Khachikian G. J. Meteorological Effects in the Ionosphere, 272 p. (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1987) [in Russian].
15. Fedorenko A. K., Bespalova A. V., Cheremnykh O. K., Kryuchkov E. I. A Dominant Acoustic-Gravity Mode in the Polar Thermosphere. *Ann. geophys.*, **33**, 101—108 (2015), — www. ann-geophys.net/33/101/2015/doi:10.5194/angeo-33-101-2015.
16. Fedorenko A. K. Determination of Acoustic-Gravity Wave Periods on Basis of Direct Satellite Measurements. *Kosm. nauka tekhnol.*, **16** (N 6), 24—32 (2010) [in Russian].
17. Fedorenko Yu. P. Response of the Authors to the Commentary by G. V. Lizunov on Our Paper "Spatio-Temporal Dynamics of Traveling Ionospheric Disturbances". *Kosm. nauka tekhnol.*, **23** (N 2), 52—67 (2017) [in Russian].
18. Fedorenko Yu. P., Fedorenko V. N., Dorohov V. L. Diagnostics of Parameters of Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances With the Help Radioscopy Ionosphere by Signals Low-Orbital Navigating Satellites. *Vestn. Kharkiv Karazin Nat. Univ., Ser.: Radiofiz. Elektron.*, **20** (1010), 97—112 (2012) [in Russian].
19. Fedorenko Yu. P., Tyrnov O. F., Fedorenko V. N., Dorohov V. L. Model of Traveling Ionospheric Disturbances. *J. Space Weather Space Clim.*, **3** (A30), 1—28 (2013).
20. Francis S. H. A Theory of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances. *J. Geophys. Res.*, **79** (N 34), 5245—5260 (1974).
21. Francis S. H. Global Propagation of Atmospheric Gravity Waves: A review. *J. Atmos. and Terr. Phys.*, **37** (N 6-7), 1011—1054 (1975).
22. Garmash K. P., Leus S. G., Chernogor L. F., Shamota M. A. Geomagnetic Pulsations Accompanying Missile Launches From Various Space Launch Facilities in the World. *Kosm. nauka tekhnol.*, **15** (N 1), 31—43 (2009.) [in Russian].
23. Garmash K. P., Leus S. G., Chernogor L. F., Shamota M. A. Statistical Characteristics of the Earth's Electromagnetic Field Fluctuations. *Radiofizika i radioastronomiya*, **8** (N 2), 163—180 (2003) [in Russian].
24. Garmash K. P., Leus S. G., Chernogor L. F., Shamota M. A. Variations of the Geomagnetic Field Accompanying the Launches of Rockets and Flights of Space Vehicles. *Kosm. nauka tekhnol.*, **13** (N 6), 87—98 (2007) [in Russian].
25. Gershman B. N. Dynamics of Ionospheric Plasma, 256 p. (Nauka, Moscow, 1974) [in Russian].
26. Godin O. A., Zabotin N. A., Bullett T. W. Acoustic-Gravity Waves in the Atmosphere Generated by Infragravity Waves in the Ocean. *Earth, Planets and Space*, **67**:47, doi:10.1186/s40623-015-0212-4 (2015).
27. Gossard E. E., Hooke W. H. Waves in the Atmosphere, 532 p. (Mir, Moscow, 1978) [in Russian], Transl. from Eng., 456 p. (Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1975).
28. Grigor'yev G. I. Acoustic-Gravity Waves in the Earth's Atmosphere (review). *Izv. VUZov Radiofizika*, **1**, 3—25 (1999) [in Russian].
29. Hines C. O. Internal Atmospheric Gravity Waves at Ionospheric Heights. *Can. J. Phys.*, **38**, 1441—1481 (1960).

30. Hocke K., Schlegel K. A Review of Atmospheric Gravity Waves and Traveling Ionospheric Disturbances: 1982–1995. *Ann. geophys.*, **14**, 917–940 (1996).
31. Hunsucker R. D. Atmospheric Gravity Waves Generated in the High-Latitude Ionosphere: A Review. *Rev Geophys. and Space Phys.*, **20** (N 2), 293–315 (1982).
32. Jacobs J.A., Kato Y., Matsushita S., Troitskaya V.A. Classification of Geomagnetic Micropulsations. *J. Geophys. Res.*, **69**, 180–181 (1964).
33. Kleimenova N. G. Geomagnetic pulsations, 611–626 (Model of Space, Vol. 1, MGU, Moscow, 2007) [in Russian].
34. Kunitsyn W. E., Suraev S. N., Akhmedov R. R. Modeling Propagation of Acoustic Gravity Waves in the Atmosphere for Different Surface Sources. *Vestn. Mosk. Univ., Sert. 3. Fiz. Astron.*, **2**, 59–63 (2007) [in Russian].
35. Liu C. H., Yeh K. C. Exciting of Acoustic-Gravity Waves in an Isothermal Atmosphere. *Tellus.*, **23**, 150–163 (1971).
36. Lizunov G. V., Leontiev A. Yu., Skorokhod T. V. Study of Ionosphere Dynamics in the Project "Ionosphere-Micro", 26–45 (2013). V knige Kosmicheskiy proyekt «Ionosfera-Mikro», 218 p. (Akademperiodika, Kyiv, 2013) [in Russian].
37. Lizunov G. V., Skorokhod T. V. Planetary Distribution of Medium-Scale Atmospheric Gravity Waves Obtained From Satellite Measurements. *Kosm. nauka tekhnol.*, **16** (N 1), 40–45 (2010) [in Russian].
38. Martyn D. F. Celluar Atmospheric Waves in the Ionosphere and Troposphere. *Proc. Roy. Soc.*, A201, 216–234 (1950).
39. Munro G. H. Short-Period Changes in the F Region of the Ionosphere. *Nature*, **162** (N 4127), 886–887 (1948).
40. Nielson D. L. The Effects of Nuclear-Burst-Produced Acoustic Gravity Waves on HF Communication Systems. *Effects of atmospheric acoustic gravity waves on electromagnetic wave propagation, NATO AGARD Conference Proceedings*, **115**, 509–512 (1972).
41. Pudovkin M.I., Raspopov O.M., Kleimenova N.T. Perturbation of the Earth's Electromagnetic Field, 271 p. (Leningradskiy universitet, Leningrad, 1976) [in Russian].
42. Rolland L. M., Lognonn P., Astafyeva E., et al. The Resonant Response of the Ionosphere Imaged After the 2011 of the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets and Space*, **63**, 853–857 (2011).
43. Row R. V. Acoustic-Gravity Waves in the Upper Atmosphere Due to a Nuclear Detonation and an Earthquake. *J. Geophys. Res.*, **72** (N 5), 1599–1610 (1967).
44. Samsonov S. N., Plotnikov I. Ya., Saibek D. G., Waterman Yu. The Relationship Between Solar Wind Parameters and High-Latitude Magnetic Pulsations. *Kosm. nauka tekhnol.*, **12** (N 1), 80–84 (2006) [in Russian].
45. Shamota M. A. Magnetometric Monitoring of High-Energy Processes in the Geocosmos, 153 p. (Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk, Kharkiv, 2011) [in Russian].
46. Sokolova O. I., Krasnov V. M., Nikolaevsky N. F. Changes in the Geomagnetic Field Under the Influence of Missile Launches from the Baikonur Cosmodrome. *Geomagnetizm i aeronomiya*, **43** (N 4), 561–565 (2003) [in Russian].
47. Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Dorohov V. L. Spatio-Temporal Dynamics of Traveling Ionospheric Disturbances. *Kosm. nauka tekhnol.*, **22** (N 5), 3–70 (2017) [in Russian].
48. Welles H. W., Watts J. M., George D. E. Detection of Rapidly Moving Ionospheric Clouds. *Phys. Rev.*, **69**, 540–541 (1946).
49. Yampolsky Yu. M., Zalizovsky A. V., Litvinenko L. N., et al. Variations of the Magnetic Field in the Antarctic and Conjugate Region (New England) Stimulated by Cyclonic Activity. *Radiofizika i radioastronomiya*, **9** (N 2), 130–151 (2004) [in Russian].
50. Yeh K. C., Liu C. H. Acoustic-Gravity Waves in the Upper Atmosphere. *Rev Geophys. and Space Phys.*, **12** (N 2), 193–216 (1974).

Ю. П. Федоренко

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

### ЗБУДЖЕННЯ НАЗЕМНИХ ГЕОМАГНІТНИХ ПУЛЬСАЦІЙ РС5 АКУСТИКО-ГРАВІТАЦІЙНИМИ ХВИЛЯМИ

У наземних вимірювальних пунктах, віддалених від локального енерговиділення в атмосфері на відстані 1500...10000 км, спостерігаються від двох до чотирьох серій флукутацій напруженості геомагнітного поля. У роботі показано, що ці флукутації збуджуються великомасштабними акустико-гравітаційними хвиллями, що прийшли до вимірювальних пунктів від місця енерговиділення — стартів потужних ракет і падіння великого метеорита.

**Ключові слова:** серії флукутацій напруженості геомагнітного поля; великомасштабні акустико-гравітаційні хвилі, місця локального енерговиділення, старти потужних ракет, падіння великого метеорита.

Yu. P. Fedorenko

V. N. Karazin National University of Kharkiv, Ukraine

### EXCITATION OF GROUND-BASED GEOMAGNETIC PULSATIONS PC5 BY ACOUSTIC-GRAVITY WAVES

We analyze two to four series of geomagnetic field intensity fluctuations, which were observed at the ground-based measuring stations located at distances of 1500...10000 km from the source of local energy release in the atmosphere. We evaluate and explain that these fluctuations are excited by large-scale acoustic-gravity waves generated by powerful rocket launches and a large meteorite fall.

**Keywords:** geomagnetic field fluctuation, large-scale acoustic-gravitational wave, local energy release, powerful rocket launch, large meteorite fall.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.03.038>

УДК 629.7.05

**А. И. Ткаченко**

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем  
Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины, Киев, Украина

## ВТОРОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ПОЛЕТНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ

---

*Рассматривается возможность улучшения точности полетной геометрической калибровки съемочного комплекса космического аппарата путем использования уравнений второго приближения.*

**Ключевые слова:** полетная геометрическая калибровка, космический аппарат, маркеры, камера, звездный датчик, второе приближение.

---

В круге публикаций, к которому относится настоящая работа [1, 3–5], понятие полетной геометрической калибровки (далее — калибровки) ограничивается последовательностью действий по уточнению взаимной ориентации съемочной камеры и звездного датчика в корпусе космического аппарата (КА), несущего эти приборы. Недопределенность названной ориентации происходит от технологического несовершенства процедур предполетной наземной калибровки и от факторов, влияющих на бортовой оптико-электронный комплекс при запуске и эксплуатации КА. Считаем, что при калибровке используются снимки координатно привязанных наземных ориентиров (маркеров), находящихся на трассе полета КА или вблизи нее. Калибровка включает полетный этап — съемку маркеров с орбиты — и наземный этап — обработку снимков, переданных на землю вместе с синхронно полученными показаниями звездного датчика и аппаратуры потребителя GPS.

Введем, как в работе [4], ортонормированные координатные базисы: базис **K**, связанный с каме-

рой, с началом в ее центре проекции — точке *O*; базис **E**, связанный со звездным датчиком, условно с тем же началом; базис **J** — геоцентрический, произвольным образом связанный с Землей. Представления трехмерных векторов в каком-либо из базисов отмечаем соответствующими нижними индексами. Преобразование координат из базиса **K** в **E** определяется неизвестной матрицей вращения  $C_{EK}$ . Она аппроксимируется заданной матрицей вращения  $C^*_{EK}$ . В первом приближении

$$C^*_{EK} \approx [E_3 + \Phi(\theta_E)] C_{EK}, \quad (1)$$

где  $\theta_E = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T = \text{const}$  — вектор малого поворота, характеризующий ошибку предполетной калибровки,  $E_3$  — единичная  $(3 \times 3)$ -матрица,  $\Phi$  — кососимметрическая  $(3 \times 3)$ -матрица оператора векторного умножения. Вектор  $\theta_E^*$ , найденный в процессе калибровки как достаточно точная оценка вектора  $\theta_E$ , используется для коррекции матрицы по формуле первого приближения

$$C_{EK} \approx [E_3 + \Phi(\theta_E^*)] C^*_{EK}. \quad (2)$$

Пусть *P* — место нахождения маркера на земной поверхности, заданное геоцентрическим радиусом-вектором  $r_j = \text{const}$ ,  $R_j$  — геоцентрический радиус-вектор точки *O* в момент съемки маркера

$P$ , найденный с помощью бортовой аппаратуры GPS,  $\mathbf{e}_j$  — единичный вектор, полученный нормированием вектора  $\mathbf{R}_j - \mathbf{r}_j$ ,  $\mathbf{e}_K$  — единичный вектор прямой  $PO$ , найденный с помощью камеры,

$$\mathbf{e}_j^* = C_{JE} \mathbf{e}_E^* \quad \mathbf{e}_E^* = C_{EK} \mathbf{e}_K^*, \quad (3)$$

$C_{JE}$  — матрица преобразования координат из базиса  $E$  в  $J$ , найденная с использованием показаний бортового звездного датчика. Оценка первого приближения  $\theta_E^*$  для вектора  $\theta_E$  может быть найдена в результате полетной калибровки как решение системы уравнений, соответствующих доступным снимкам и запечатленным маркерам [4]:

$$\begin{aligned} G \theta_E^* &= \mathbf{e}_j^* - \mathbf{e}_j, \\ G &= -C_{JE} \Phi(\mathbf{e}_E^*). \end{aligned} \quad (4)$$

Система уравнений (4) решается методом наименьших квадратов. Если предполетная наземная калибровка обеспечила исходные значения элементов  $\theta_E$  порядка  $10'$ , то в результате последующей полетной калибровки путем решения уравнений (4) и уточнения матрицы  $C_{EK}^*$  по формуле (2) может быть достигнута остаточная точность определения взаимной ориентации базисов  $K$  и  $E$  порядка  $10''$  [1, 3–5].

Предполетная наземная калибровка требует сложного оборудования и значительных трудозатрат. В этой связи может оказаться полезной технология второго приближения в полетной калибровке. Для ее обоснования заимствуем с точностью до обозначений, например, формулу (1.3.11) из работы [2]:

$$\begin{aligned} C_{EK}^* &= \left[ E_3 + \frac{\sin \theta}{\theta} \Phi(\theta_E) + \frac{1 - \cos \theta}{\theta^2} \Phi^2(\theta_E) \right] C_{EK}, \\ \theta &= (\theta^T \theta)^{1/2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Выполним корректное упрощение формулы (5), проигнорировав величины выше второго порядка малости относительно  $\theta_E$  и  $\theta$ . В результате получается выражение второго приближения для  $C_{EK}^*$ , более точное, чем (1):  $C_{EK}^* \approx [E_3 + \Phi(\theta_E) + \Phi^2(\theta_E)/2] C_{EK}$ . Из него и из (3) следует уравнение второго приближения

$$G \theta_E^{**} = \mathbf{e}_j^* - \mathbf{e}_j + C_{JE} \Phi^2(\theta_E^*) \mathbf{e}_E^* / 2. \quad (6)$$

При реализации формулы (6) используются те же показания камеры, звездного датчика и GPS,

что и в формуле (4), причем без дополнительных преобразований информации. Оценка второго приближения  $\theta_E^{**}$ , полученная путем решения доступных уравнений (6), используется вместо  $\theta_E^*$  при уточнении матрицы  $C_{EK}^*$  по формуле (2).

Компьютерное моделирование процессов калибровки по формулам (4), (6) выполнялось при условиях, близких к тем, которые предусмотрены в работах [4, 5], включая характеристики возмущений. Имитировалось движение КА по слабоэллиптической солнечно-синхронной орбите высотой около 670 км. Три известных маркера располагались в вершинах равнобедренного прямоугольного треугольника с катетом  $c$ . Съемка маркеров производилась, когда они находились на трассе полета или вблизи нее. Моделирование реализовалось как серия вариантов счета, в которой для формирования всех случайных величин использовался генератор последовательности псевдослучайных чисел, инициированной в первом варианте серии и переходящей из варианта в вариант. Серии различались значениями с и порядком приближения при калибровке. В каждом варианте значения  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  задавались заново как нормально распределенные центрированные случайные величины. Ошибки звездного датчика вводились при каждом измерении как нормально распределенные случайные углы поворотов вокруг двух направлений, перпендикулярных к оптической оси датчика, и вокруг самой этой оси со средними квадратичными отклонениями  $5'', 5''$  и  $12''$  соответственно. Точность восстановления линии визирования маркера по измеренным координатам изображения на чувствительной площадке камеры характеризуется случайными ошибками, связанными с размером пикселя камеры 8.75 мкм. Среднее квадратичное отклонение нормально распределенных случайных ошибок GPS составляет 3 м.

Статистические характеристики остаточных ошибок калибровки  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  — средние квадратичные отклонения  $\sigma_{\theta_1}, \sigma_{\theta_2}, \sigma_{\theta_3}$  — рассчитывались в секундах дуги на основании обработки 100 вариантов серии. Существенная особенность моделирования состояла в том, что среднему квадратичному отклонению исходных ошибок  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  приписывалось не значение  $10'$ , как в работах

**Таблица 1. Ошибки калибровки. Один снимок**

$c, \text{км}$	$A$	$\sigma_{\theta 1}$	$\sigma_{\theta 2}$	$\sigma_{\theta 3}$
6.7	2	6.2	5.1	35.6
6.7	1	32.6	27.3	39.3
0.8	2	8.4	6.5	267.2
0.8	1	33.0	27.4	268.1

**Таблица 2. Ошибки калибровки. Шесть снимков**

$c, \text{км}$	$A$	$\sigma_{\theta 1}$	$\sigma_{\theta 2}$	$\sigma_{\theta 3}$
6.7	2	2.1	2.2	24.4
6.7	1	32.0	26.9	29.6
0.8	2	4.2	4.0	184.4
0.8	1	32.1	27.1	186.1

[4, 5], а значение  $60'$ . Столь утрированно грубое предположение вводилось с целью отчетливо выявить эффект второго приближения (6).

Некоторые результаты моделирования калибровки с использованием единственного снимка маркеров, выполненного из положения КА непосредственно над участком с маркерами, представлены в табл. 1. Первая графа табл. 1 содержит значения с при реализации конкретной серии вариантов, к которой относится соответствующая строка. Во второй графе ( $A$  — approximation) указан порядок приближения при калибровке: 1 — первое (только уравнения (4)), 2 — второе (уравнения (4) и (6)). В трех последних графах даны собственно результаты моделирования в охарактеризованной выше форме.

В табл. 2 подобным образом показаны результаты калибровки с использованием шести снимков участка с теми же маркерами. Промежуток между последовательными моментами экспонирования 7 с. В процессе съемок при наведении оптической оси камеры на участок с маркерами тангаж КА варьировался от  $12^\circ$  при первом экспонировании до  $-12^\circ$  при последнем.

Прежде всего заметно, как в принятых условиях переход от первого приближения ко второму повышает точность калибровки. В иных, менее грубых начальных предположениях второе приближение калибровки по меньшей мере не ухудшает точности по сравнению с первым прибли-

жением. Вообще значительное расхождение первого и второго приближений — признак аномально больших начальных значений  $\theta_E$ .

Увеличение расстояний между маркерами улучшает обусловленность системы уравнений вида (4) и тем самым способствует повышению точности калибровки. Из табл. 1 и 2 видно, что во втором приближении, как и следовало ожидать, точность калибровки снижается с уменьшением с и что в первом приближении подобный эффект практически незаметен на фоне ошибок, вызванных грубостью исходных данных. Нетрудно установить, как при использовании нескольких снимков проявляются порознь факторы расширения информации и второго приближения и сколь благоприятно совместное воздействие этих факторов на точность калибровки.

Результаты калибровки использовались при моделировании координатной привязки наземных объектов по методике, изложенной в работе [4]. Выполнялось шесть снимков квадратного участка  $7 \times 7$  км с неизвестными точечными объектами. Если координатной привязке предшествовала калибровка во втором приближении, то точность локализации неизвестных объектов характеризовалась средними квадратичными отклонениями 10–20 м. Если же в координатной привязке использовались только результаты первого приближения калибровки, то такого же типа характеристики точности привязки увеличивались до 70–80 м. Уместно отметить, что уточнения результатов калибровки во втором приближении относятся прежде всего к ошибкам  $\theta_1, \theta_2$ . Последние оказывают определяющее влияние на точность координатной привязки наземных объектов, относительно близких к точке пересечения оптической оси камеры с земной поверхностью [5].

Возможно, прием второго приближения в полетной калибровке позволил бы ослабить требования к наземной предполетной калибровке и упростить эту процедуру.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Лебедев Д. В. О привязке космических снимков по орбитальным данным // Проблемы управления и информатики. — 2016. — № 6. — С. 120–132
- Панов А. П. Математические основы теории инерциальной ориентации. — Киев: Наук. думка, 1995. — 280 с.

3. Ткаченко А. И. Алгоритмы согласования ориентации звездного датчика и камеры космического аппарата // Проблемы управления и информатики. — 2015. — № 3. — С. 116–126.
4. Ткаченко А. И. О координатной привязке наземных объектов по космическим снимкам // Космічна наука і технологія. — 2015. — 21, № 2. — С. 65–72.
5. Ткаченко А. И. Координатная привязка наземных объектов по неточным космическим снимкам // Проблемы управления и информатики. — 2016. — № 4. — С. 116–123.

*Стаття надійшла до редакції 13.04.17*

## REFERENCES

1. Lebedev D. V. On the coordinate determination of space images by orbital data. *Problemy upravleniya i informatiki*, N 1, 120–132 (2015) [in Russian].
2. Panov A. P. Mathematical Fundamentals of Inertial Orientation Theory, 280 p. (Naukova dumka, Kiev, 1995) [in Russian].
3. Tkachenko A. I. Algorithms of the attitude matching of star tracker and camera of the spacecraft. *Problemy upravleniya i informatiki*, N 3, 115–136 (2015) [in Russian].
4. Tkachenko A. I. On a geo-referencing of terrestrial objects using space snapshots. *Kosm. nauka tehnol.*, 21 (4), 65–72 (2015) [in Russian].
5. Tkachenko A. I. Geo-referencing of ground object using inexact space snapshots. *Problemy upravleniya i informatiki*, No 4, 116–123 (2016) [in Russian].

## O. I. Tkachenko

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, Київ, Україна

## ДРУГЕ НАБЛИЖЕННЯ ПОЛЬТОНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ

Розглядається можливість поліпшення точності польотного геометричного калібрування знімального комплексу космічного апарату шляхом використання рівнянь другого наближення.

**Ключові слова:** польотне геометричне калібрування, космічний апарат, маркери, камера, зоряний датчик, рівняння другого наближення.

## A. I. Tkachenko

International Research and Training Center  
for Information Technologies and Systems of the National  
Academy of Sciences of Ukraine and Ministry  
of Education and Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## THE SECOND APPROXIMATION OF THE IN-FLIGHT GEOMETRIC CALIBRATION

We consider and explain an application of the second approximation equations for the accuracy improvement of the in-flight geometric calibration of a spacecraft imaging complex.

**Keywords:** in-flight geometric calibration, spacecraft, landmarks, camera, star tracker, second approximation equations.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.03.042>

УДК 523.44

**А. М. Казанцев, Л. В. Казанцева**

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## НЕГРАВІТАЦІЙНИЙ ЕФЕКТ ТА ОРІЄНТАЦІЯ ОСЕЙ ОБЕРТАННЯ КІЛОМЕТРОВИХ АСТЕРОЇДІВ ГОЛОВНОГО ПОЯСУ

Виконано чисельні розрахунки еволюції орбіт астероїдів головного поясу від 2005 р. до 2016 р. Розрахунки показують, що в наші дні в у зміні великих півосей орбіт помітної частини низькоальбедових астероїдів головного поясу розмірами до 40 км позначається вплив негравітаційного ефекту кометної природи. Зміна великої півосі орбіти астероїда залежить від орієнтації осі обертання. Тому точні чисельні розрахунки еволюції орбіт астероїдів можуть вказувати на напрямок (прямий чи зворотний) осі їхнього обертання.

**Ключові слова:** астероїд, вісь обертання, негравітаційний ефект.

Вперше про можливість дії у поясі астероїдів негравітаційного ефекту (НГЕ), що викликає просторове розділення тіл з різними альбедо, було вказано близько 10 років тому [2]. Про це свідчать точні розрахунки еволюції орбіт астероїдів та розподіл альбедо тіл в окремих сімействах астероїдів. При цьому використовувалась база IRAS (Infrared Astronomical Satellite) [7], що містить дані про альбедо та розміри 2228 астероїдів.

На сьогодні є можливість використати базу WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) [4], що включає альбедо та розміри більш ніж 90 тисяч астероїдів. Крім того, сучасні каталоги орбіт астероїдів мають дещо менші похибки порівняно з каталогами 10-річної давності. Тому повторне дослідження цього питання має сенс.

### ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ НЕГРАВІТАЦІЙНОГО ЕФЕКТУ

Потрібно мати два каталоги елементів орбіт астероїдів на достатньо рознесені епохи. Викону-

ється чисельне інтегрування еволюції орбіт астероїдів від епохи більш раннього каталогу до епохи більш пізнього. Далі визначаються різниці елементів орбіт

$$da = a_{ct} - a_{cl},$$

де  $a_{ct}$  і  $a_{cl}$  — значення великої півосі орбіти астероїда на більш пізню епоху з каталогу та з розрахунків відповідно.

На значення  $da$  будуть впливати такі фактори: а) помилки у виконаних чисельних розрахунках, б) похибки каталожних елементів, в) реальний вплив тіл, не врахованих у розрахунках (зближення з великими астероїдами чи падіння метеоритів), г) негравітаційні ефекти різної природи.

У нашому розпорядженні були каталоги орбіт астероїдів Міжнародного центру малих планет (MPC) на епохи 18.08.2005 р. та 13.01.2016 р. В каталогах значення великих півосей орбіт приведено з точністю до  $10^{-7}$  а. о. Для оцінки точності каталогів і програми обчислень виконувалось чисельне інтегрування орбіт 20 крупних астероїдів в кожній з п'яти різних зон головного

поясу при значеннях великих півосей орбіт. Зрозуміло, що всі перераховані фактори, які впливають на значення  $da$ , для крупних астероїдів будуть позначатися мінімально. Середні значення  $da$  в кожній зоні великих півосей орбіт наведено у табл. 1. Видно, що у чотирьох зонах з п'яти значення  $da$  явно менші за похибки каталогів ( $10^{-7}$  а. о.). Лише на зовнішньому краї головного поясу значення  $da$  дещо більші. Це цілком зрозуміло, адже для тіл, що рухаються на більших відстанях, похибки елементів орбіт мають бути більшими. Таким чином, можна зробити висновок, що точність наших розрахунків ніяк не нижча за точність каталогів. Метод і програму інтегрування наведено в роботі [1].

### ПОШУК НЕГРАВІТАЦІЙНОГО ЕФЕКТУ З ВИКОРИСТАННЯМ БАЗИ WISE

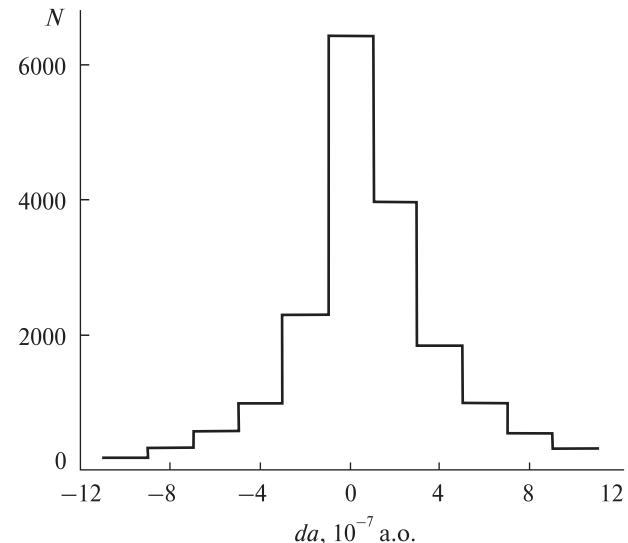
База WISE містить альбедо 94820 окремих астероїдів [4]. Орбіти 52094 з них представлені в обох каталогах MPC. Було виконано чисельне інтегрування всіх цих орбіт від 2005 р. до 2016 р. Величини  $da$  визначалися для астероїдів головного поясу з розмірами  $5 < D < 40$  км та альбедо в ін-

Таблиця 1. Середні значення  $da$  в різних зонах великих півосей орбіт

$a$ , а. о.	$da, 10^{-7}$ а. о.
2.20...2.30	0.35
2.40...2.50	0.43
2.70...2.80	0.40
2.90...3.00	0.55
3.10...3.20	1.13

Таблиця 2. Кількості астероїдів зі збільшенням та зменшенням великих півосей орбіт в різних діапазонах  $|da|$

$ da , 10^{-7}$ а. о.	$N_+$	$N_-$	$N_+ / N_-$
1...3	3935	2275	1.7
3...5	1835	977	1.9
5...7	972	554	1.8
7...9	518	314	1.7
9...11	305	182	1.7



Розподіл кількості  $N$  астероїдів з альбедо  $p_v < 0.2$  по значеннях величини  $da$

тервалі від 0.02 до 0.60. Тіла з розмірами менше 5 км можуть мати помітні похибки в елементах орбіт, а на крупні тіла НГЕ навряд чи можуть впливати. Значення альбедо астероїдів, менші за 0.02 та більші за 0.60, скоріш за все є помилковими.

Перерахованим вище умовам відповідають 50630 тіл. Значення  $da$  цих тіл лежать у межах  $(-3...+1.7) \cdot 10^{-5}$  а. о. Для аналізу відбиралися значення  $da = (-1...+1) \cdot 10^{-6}$  а. о. (22363 значення). Занадто великі значення  $da$  можуть бути викликані чинниками, не пов'язаними з дією НГЕ. Будувалися розподіли значень  $da$  по значеннях альбедо астероїдів  $p_v$  і проводилися усереднені лінійні залежності

$$da = c_1 \cdot p_v + c_0.$$

Вплив НГЕ на астероїди можна бачити за знанням та значенням коефіцієнта  $c_1$ . Якщо цей коефіцієнт відмінний від нуля з досить високою статистичною вірогідністю, то можна припускати, що на орбіти астероїдів в інтервалі між епохами каталогів впливає деякий НГЕ.

Для описаної вибірки 22363 астероїдів коефіцієнт  $c_1$  становив  $-7.6 \cdot 10^{-8}$  а. о. при рівні значимості 0.001 (вище «3-сігма»). Головний внесок у спад залежності  $da(p_v)$  вносять низькоальбедні астероїди з  $p_v < 0.2$ . Для цього діапазону альбедо:

$$c_1 = -6.5 \cdot 10^{-7} \text{ («4.5-сігма»).}$$

Дія НГЕ переважно впливає на збільшення великих півосей тіл з малими альбедо. На рисунку показано розподіл кількості астероїдів з  $p_v < 0.2$  по значеннях  $da$ . Видно, що максимум розподілу відповідає значенням  $da \approx 0$ . Це ще раз свідчить про достатню точність розрахунків та елементів орбіт. Крім того видно, що кількість астероїдів з додатними значеннями  $da$  помітно більша від кількості тіл з від'ємними значеннями  $da$ . Для наведених на рисунку п'яти інтервалів додатних та від'ємних значень  $da$  у табл. 2 вказано відповідні кількості астероїдів ( $N_+$  та  $N_-$ ), а також їхне відношення. Видно, що перевага  $N_+$  над  $N_-$  зберігається на всьому проміжку величин  $da$  з майже постійним відношенням. Цей факт свідчить про невипадковий характер переважного збільшення великих півосей астероїдів з малими альбедо і може бути використаний для пошуків фізичного механізму дії НГЕ.

### МОЖЛИВИЙ ФІЗИЧНИЙ МЕХАНІЗМ ДІЇ НЕГРАВІТАЦІЙНОГО ЕФЕКТУ

При номінальній точності великих півосей орбіт в каталогах  $10^{-7}$  а. о. реальними і викликаними дією НГЕ можна вважати абсолютні величини  $da = (2...10) \cdot 10^{-7}$  а. о.

Насамперед варто визначити, чи зможе таку зміну великих півосей орбіт забезпечити ефект Ярковського. В роботі [6] отримано, що кам'яний астероїд діаметром  $D = 1$  м, що рухається в головному поясі, може змінити велику піввісь своєї орбіти під дією ефекту Ярковського на 1 а. о. за 1.5 млн років.

Велика піввісь орбіти тіла на певній геліоцентричній відстані однозначно визначається величиною орбітальної швидкості тіла. Отже, зміна великої півосі орбіти астероїда за рахунок ефекту Ярковського обумовлена додатковою орбітальною швидкістю, наданою тілу за рахунок даного ефекту. Величина додаткової швидкості пропорційна кількості сонячного випромінювання, що попадає на поверхню тіла, тобто  $D^2$ . В той же час ця додаткова швидкість обернено пропорційна масі тіла, тобто  $D^3$ . Отже, для тіла діаметром 20 км, що відповідає середньому розміру астероїдів нашої вибірки, зміна великої півосі орбіти під дією

ефекту Ярковського має бути в 20 000 разів повільнішою, ніж для тіла діаметром 1 м, тобто близько  $3 \cdot 10^{-10}$  а. о. за 10 років.

На зовнішньому краї поясу середні густини астероїдів можуть становити не  $2 \text{ г}/\text{cm}^3$ , як для кам'яних тіл, а вдвічі менше. Для таких тіл дія ефекту Ярковського буде помітнішою. Але ж в цій зоні головного поясу і кількість сонячної енергії менша. Отже, отримані величини  $da = (2...10) \cdot 10^{-7}$  а. о. за 10 років не пояснюються дією ефекту Ярковського.

Можливим механізмом дії шуканого НГЕ може бути виліт речовини з поверхні астероїда. Оціночні розрахунки були зроблені для тіла розміром 20 км та середньою густиною  $1000 \text{ кг}/\text{m}^3$ , яке рухається по орбіті з ексцентризитетом 0.10 та величиною піввіссю 3 а. о. Моделюванням зміни геліоцентричної швидкості  $V_h$  такого тіла було визначено, що при збільшенні значення  $V_h = 19 \text{ км}/\text{s}$  на  $1.0 \text{ мм}/\text{s}$  велика піввісь орбіти збільшиться на  $4 \cdot 10^{-7}$  а. о.

Ця цифра відповідає середньому значенню величин  $da$  для астероїдів нашої вибірки. Орієнтуясь на дане значення, оцінімо інтенсивність вильоту речовини з поверхні тіла, необхідну для такої зміни великої півосі його орбіти. При цьому будемо вважати, що виліт речовини відбувається переважно в напрямку, протилежному орбітальній швидкості астероїда.

Якщо за 10 років додаткова швидкість, надана тілу речовиною, що вилітає з його поверхні, складає  $1 \text{ мм}/\text{s}$ , то це відповідає додатковій швидкості  $3 \cdot 10^{-12} \text{ м}/\text{s}$  за кожну секунду. Маса тіла близька до  $4 \cdot 10^{15} \text{ кг}$ . Приймемо, що швидкість вильоту речовини з його поверхні становить  $30 \text{ м}/\text{s}$ , що лежить у межах реальних значень швидкостей вильоту пилових часток для комет головного поясу. В такому разі для надання тілу потрібної додаткової швидкості кожної секунди має вилітати біля 400 кг речовини з частини його поверхні, що відповідає площині поперечного перерізу (міделя), або  $1.3 \text{ mg}$  з кожного  $\text{m}^2$  цієї площини. Така інтенсивність пиловиділення приблизно на два порядки менша, ніж для комет сімейства Юпітера.

Використовуючи сонячну сталь та відстань астероїда від Сонця, неважко отримати, що доля сумарної кінетичної енергії речовини, що вилі-

тає з поверхні астероїда, складає приблизно  $4 \cdot 10^{-6}$  величини сонячної енергії, що падає на його поверхню.

Таким чином, виліт речовини з поверхонь астероїдів цілком може пояснити отримані вище значення  $da$ . Той факт, що зазначений НГЕ більш помітний для низькоальбедних астероїдів, свідчить на користь такого НГЕ. Адже астероїди з малими альбедо більш порохняві, і на їхніх поверхнях має бути більше летючих речовин порівняно з тілами з більшими альбедо.

Наведене пояснення дії НГЕ може бути слушним, якщо більшість астероїдів у головному поясі мають пряме осьове обертання. На сьогодні напрямки осьового обертання визначені менш ніж для 200 астероїдів. Цю інформацію можна знайти у відкритій базі Planetary Data System [3]. Біля двох третин тіл мають пряме обертання. Відповідно до даних [5] подібне співвідношення має місце і для інших каталогів. Таким чином, наявність даного НГЕ узгоджується з відомими спостережними даними про осьове обертання астероїдів. Більше того, значення, наведені в табл. 2, досить добре узгоджуються з даними про співвідношення між астероїдами з прямим та зворотним осьовим обертанням.

На жаль, серед астероїдів з відомими напрямками осьового обертання немає жодного з  $|da| > 2 \cdot 10^{-7}$  а. о., тому підтвердження дії НГЕ за напрямками обертання конкретних астероїдів можна отримати в майбутньому. Разом з тим отримані дані про зміну великих півосей орбіт можуть вказувати на напрямок осьового обертання астероїдів.

## ВИСНОВКИ

Виконані чисельні розрахунки еволюції орбіт астероїдів свідчать, що в наші дні в русі помітної частини астероїдів головного поясу з розмірами до 40 км позначається вплив деякого негравітаційного ефекту. Такий НГЕ призводить до збільшення великих півосей орбіт низькоальбедних астероїдів у порівнянні з великими півосями орбіт тіл з більшими альбедо.

Фізичний механізм дії НГЕ за своєю природою може бути близький до НГЕ в кометах. Цей висновок узгоджується з наявними спостережними даними про осьове обертання астероїдів.

Визначення у майбутньому напрямків осьового обертання для наведених астероїдів дасть можливість однозначно зробити висновок про реальність дії зазначеного НГЕ. У той же час отримані дані про зміну великих півосей орбіт можуть вказувати на напрямок осьового обертання астероїдів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Казанцев А. М. Простой метод численных расчетов эволюции орбит околоземных астероидов // Астрон. вестн. — 2002. — **36**, № 1. — С. 48—54.
2. Казанцев А. М. О возможном эффекте пространственного разделения светлых и темных астероидов // Кинематика и физика небес. тел. — 2007. — **23**, № 6. — С. 349—358.
3. Kryszczynska A., Magnusson P. Asteroid spin vector compilation V5.0. EAR-A-5-DDR-ASTEROID-SPIN-VECTORS-V5.0. NASA Planetary Data System, 2008.
4. Masiero J. R., Mainzer A. K., Grav T., et al. Main Belt Asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters // Astrophys. J. — 2011. — **741**, N 2. — art. id.68. — 20 p.
5. Paolicchi P., Kryszczynska A. Spin vectors of asteroids: Updated statistical properties and open problems // Planetary and Space Sci. — 2012. — **73**, N 1. — P.70—74.
6. Spitale J., Greenberg R. Numerical evaluation of the general Yarkovsky effect: Effects on semimajor axis // Icarus. — 2001. — **149**, N 1. — P. 222—234.
7. Tedesco E. F., Noah P. V., Noah M., Price S. D. The supplemental IRAS minor planet survey // Astron. J. — 2002. — **123**, N 2. — P. 1056—1085.

*Стаття надійшла до редакції 21.11.16*

## REFERENCES

1. Kazantsev A. M. A simple method for calculating the evolution of orbits of near-Earth asteroids. *Astron. Vestnik*, **36** (N 1), 48—54 (2002).
2. Kazantsev A. M. Possible effect of spatial separation of bright and dark asteroids. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **23** (N 6), 349—358 (2007).
3. Kryszczynska A., Magnusson P. Asteroid spin vector compilation V5.0. EAR-A-5-DDR-ASTEROID-SPIN-VECTORS-V5.0. NASA Planetary Data System (2008).
4. Masiero J. R., Mainzer A. K., Grav T., et al. Main Belt Asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters. *Astrophys. J.*, **741** (N 2), art. id.68 (20 p.) (2011).
5. Paolicchi P., Kryszczynska A. Spin vectors of asteroids: Updated statistical properties and open problems. *Planetary and Space Sci.*, **73** (N 1), 70—74 (2012).

6. Spitale J., Greenberg R. Numerical evaluation of the general Yarkovsky effect: Effects on semimajor axis. *Icarus*, **149** (N 1), 222–234 (2001).
7. Tedesco E. F., Noah P. V., Noah M., Price S. D. The supplemental IRAS minor planet survey. *Astron. J.*, **123** (N 2), 1056–1085 (2002).

*A. M. Казанцев, Л. В. Казанцева*

Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета  
имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

**НЕГРАВИТАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ  
И ОРИЕНТАЦИЯ ОСЕЙ ВРАЩЕНИЯ  
КИЛОМЕТРОВЫХ АСТЕРОИДОВ  
ГЛАВНОГО ПОЯСА**

Выполнены численные расчеты эволюции орбит астероидов главного пояса от 2005 г. до 2016 г. Расчеты показывают, что в наши дни в изменении больших полуосей орбит заметной части низкоальбедных астероидов главного пояса размерами до 40 км оказывается влияние негравитационного эффекта кометной природы. Изменение большой полуоси орбиты астероида зависит от ориентации оси вращения. Поэтому точные расчеты

эволюции орбит астероидов могут указывать на направление (прямое или обратное) оси их вращения.

**Ключевые слова:** астероид, ось вращения, негравитационный эффект.

*A. M. Kazantsev, L. V. Kazantseva*

Astronomical Observatory of the Taras Shevchenko  
National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

**A NON-GRAVITATIONAL EFFECT AND SPIN  
ORIENTATION OF KILOMETER-SIZED ASTEROIDS  
OF THE MAIN BELT**

We present the results of the numerical calculations of the orbital evolution of the main belt (MB) asteroids over the period from 2005 to 2016. We show that, at the present time, the non-gravitational effects of a cometary nature are the essential factors affecting changes in the semi-major axes of the orbits of a significant part of the MB low-albedo asteroids with dimensions up to 40 km. The change in the semi-major axis of an asteroid's orbit depends on the spin direction. Therefore, precise numerical calculations of the evolution of their orbits may indicate the direction (prograde or retrograde) of the axis of their rotation.

**Keywords:** asteroid, spin axis, non-gravitational effect.

---

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.03.047>

UDC 530.12:531.51

**R. M L Baker, Jr.**

Transportation Science Corporation, USA

## HIGH-FREQUENCY GRAVITATIONAL WAVE RESEARCH AND APPLICATION TO EXOPLANET STUDIES

---

*A discussion of the history of High-Frequency Gravitational Wave (HFGW) research is first presented. Over the years until modern times, starting with the first mention of Gravitational Waves by Poincaré in 1905 and the definition of HFGWs in 1961 by Robert L. Forward, the discussion continues concerning the international research efforts to detect HFGWs. The article highlights the accomplishments of HFGW researchers in China, Russia, Ukraine, England, Australia, Japan, Germany, Spain, Italy, and the United States. Comparisons are made with Low-Frequency Gravitational Wave (LFGW) research, especially concerning the Laser Interferometer Gravitational Observatory or LIGO. In fine, there are presented several interesting perspectives concerning cosmology, the speed of time and, especially, exoplanet applications of HFGWs.*

**Keywords:** gravitational waves, high-frequency gravitational waves, HFGWs, HFGW Detectors, speed of time, exoplanets, LIGO, Starshot.

---

### INTRODUCTION

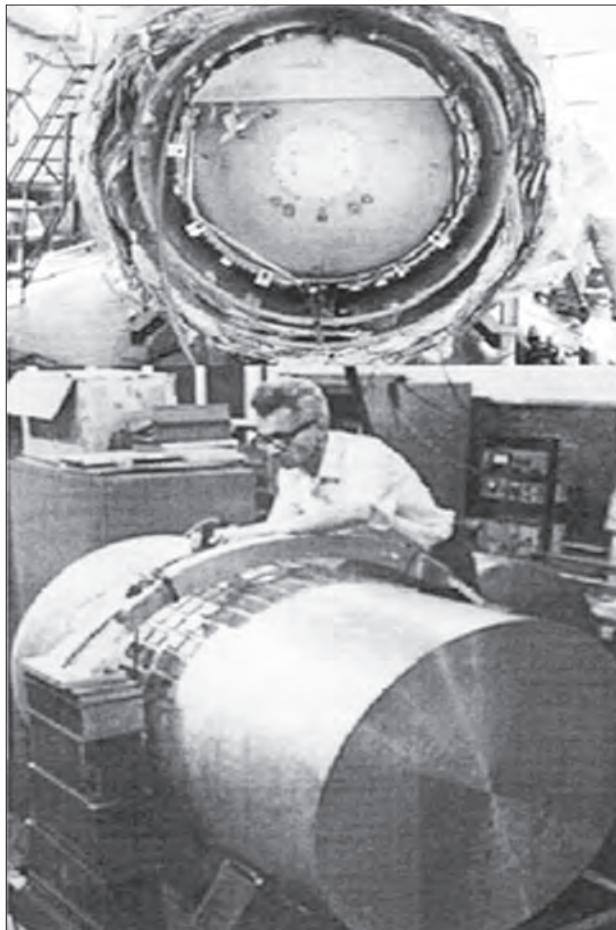
If we swim in the ocean we feel the water waves. When we listen to a song we hear acoustical waves. When we look at each other we see the light or electromagnetic waves. But are there other possibly invisible waves not so easily sensed?

It was in 1905, several weeks before Einstein presented his Special Theory of Relativity that Henri Poincaré, the famous French mathematician and Celestial Mechanic, suggested that Newton's theories needed to be modified by including "Gravitational Waves" [1]. However, Poincaré, presented little or no specific analyses.

In 1916 such Gravitational Waves (GW) were first mathematically analyzed in the paper authored by Albert Einstein, where he discussed Gravitational Waves in his theory of General Relativity [2]. Spe-

cifically, in 1918 Einstein derived the quadrupole formula or equation [3] according to which Gravitational Waves are produced in his newly studied **space-time continuum** by a time-dependent mass quadrupole moment (literally a four-pole moment, actually a  $4 \times 4$  tensor; as pointed out in an overview of gravitational radiation prepared by the Astronomy Department of the University of Maryland, there cannot be monopolar gravitational radiation, there is no dipolar gravitational radiation either, but there can be quadrupolar gravitational radiation). The quadrupole moment showed that Gravitational Waves can carry energy. Also the quadrupole wave is the simplest solution that maintains conservation of momentum during the propagation of the wave [4].

In 1936 Einstein submitted, together with Nathan Rosen, a manuscript to the "Physical Review" in which they claim that gravitational waves do not exist. In 1937, after receiving a critical referee report,



**Fig.1.** Joseph Weber and his “Weber Bar”

Einstein was upset and withdrew the manuscript (with the erroneous claim) and published, again together with Rosen, a strongly revised manuscript confirming Gravitational-Wave solutions in the “Journal of the Franklin Institute” [5]. (Rosen actually departed for Moscow just before the actual publication [6].)

After reviewing the early work of Einstein, Joseph Weber suggested the detection of Gravitational Waves utilizing a large 2,400 pound Aluminum cylinder that, when isolated from all external vibrations, would resonate like a “bell” excited by incoming Gravitational Waves — his so-called “Weber Bar” (Fig. 1). His results were inconclusive and resulted in some reports that are still debatable. It is worth noting, however, that a Weber-Bar type detector of Gravitational Waves was developed at the Institute of Theo-

retical Physics in Kiev in the late 1970s. At the end of 1970s Aleksey Zinovievich Petrov, who worked at the Institute for Theoretical Physics of the Academy of Sciences of the UkrSSR (hereafter — ITP), has initiated the work on the creation of a unique device — the Weber type antenna — for monitoring of Gravitational Waves from powerful extragalactic sources. Being a physicist-theorist, he was aware of the need for an experimental confirmation of the main principles of the General Relativity. A premature death of A. Z. Petrov made significant adjustments to the plans for theoretical and experimental gravitational studies in Ukraine. In particular, part of his followers moved to the Ukrainian Center for Standardization and Metrology of the State Committee of Statistics of the USSR. General management of works was carried out by K. A. Piragas, while a principal development of “Weber Bar” in Kiev was guided by A. M. Sviridov. This group included such Ukrainian physicists as V. I. Kopylov, S. S. Zhovnir, I. T. Zhuk, Yu. A. Opanas'yuk, A.N. Alexandrov, and others. They had spent a lot of time in attempts to detect Gravitational Waves using the constructed Weber Bar [82, 87].

#### ***Research and Detectors of Gravitational Waves.***

The first mention of High-Frequency Gravitational Waves (or HFGWs) that I could determine was in a meeting in 1961 that I had with Dr. Robert Lull Forward at my Lockheed Astrodynamics Research Center in Bel Air, California<sup>1</sup>. I had invited him over from the Hughes Research Laboratory in Malibu, California, to deliver a lecture on the “Weber Bar” that he and Dr. Joseph Weber were constructing at the Hughes Lab to detect Low-Frequency Gravitational Waves (1660 Hz). During the Question and Answer part of our Lecture, Bob Forward and I talked about building a Laboratory generator and detector for “High-Frequency Gravitational Waves”, hav-

<sup>1</sup> Lecture was given at the Lockheed Astrodynamics Research Center (LARC), 650 N. Sepulveda, Bel Air, California, USA, a few blocks from UCLA, November 16th, 1961. A Lockheed Research Report RL 15210 was published based upon notes taken by Samuel Herrick, a Lockheed Consultant and UCLA Professor. Attendees included LARC members Robert Rector, Professors Geza Gedeon, Kurt Forester, my secretary Joan Boyle (who typed up Herrick’s notes in the Lockheed Research Report of the Lecture), plus UCLA students.

ing frequencies over 100 kHz. As far as I know this was the first time the subject had been broached. I recall that we concluded that it could not be accomplished with the technology then available; but I suggested that such high-frequency gravitational waves, or HFGWs, might be useful in the study of the early Universe and would have practical applications, for example, communication (the ultimate wireless system). They would be useful for the interception of interstellar communications by extraterrestrial advanced civilizations, whose communications means of choice would be high-frequency gravitational waves since, unlike electromagnetic radiation, HFGWs pass un-attenuated through all matter including interstellar matter [7, 8].

There were no actual scientific or technical publications concerning High-Frequency Gravitational Waves that I could find until mid-1962, when Mikhail Gertsenshtein authored the pioneering paper entitled “Wave resonance of light and gravitational waves” [9]. The Gravitational-Wave frequencies being about those of light ( $4 \cdot 10^{14}$  Hz is red light,  $8 \cdot 10^{14}$  Hz is violet light) would be considered HFGWs. Unfortunately, the Gertsenshtein effect is so weak that it has no value for the detection, generation or applications of HFGWs. By the way, the idea that laid the theoretical basis for, or a precursor of, future big Gravitational-Wave interferometers, such as the Laser Interferometer Gravitational Observatory for the detection of Low-Frequency Gravitational Waves (LFGWs), was put forward by Gertsenshtein and another Russian scientist Vladislav Pustovoit in 1962 and reported on in 1963 [10].

In 1967 Rainer Weiss from the Massachusetts Institute of Technology published an analysis of interferometer use for LFGW detection and initiated the construction of a prototype with US military funding. Unfortunately, the construction was terminated before the laser LFGW detector could become operational. The concept eventually was utilized in the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory or LIGO [11].

The next publication concerning HFGWs was in August of 1964, when Leopold Ernst Halpern and Bertel Laurent wrote a paper in “Il Nuovo Cimento” [12]. Like I had in 1961, they suggested that “...at some earlier stage of development of the Universe (the

*Big Bang) were suitable to produce strong (relic) gravitational radiation” [12, p. 729]. They then discuss “short wavelength” or High-Frequency Gravitational Waves [12, p. 743] and even suggest a “gaser” generator of HFGWs [12, p. 747], analogous to a laser for electromagnetic generation.*

Leonid Petrovich Grishchuk and Mikhail Vasilievich Sazhin in early 1974 authored a paper on “Emission of gravitational waves by an electromagnetic cavity” [13], which involved HFGWs. In August of 1974 G. F. Chapline, J. Nuckolls, and L. L. Woods suggested the generation of HFGWs by nuclear explosions [14] and in 1978 Vladimir Borisovich Braginsky<sup>2</sup> and Valentin N. Rudenko wrote about “Gravitational waves and the detection of gravitational radiation” [15]. In that regard, a more recent paper by Rudenko (with N. Kolosnitsyn) in “Physica Scripta” suggests it is possible to couple a HFGW Generator and Detector (theoretically, a possible communication link) with a HFGW amplitude sensitivity of  $h \sim 10^{-31}$  m/m at frequencies in excess of  $10^{10}$  Hz. The Russians were most interested in HFGWs during the “Cold War” especially in the 1970’s. Then in 1979 Steven W. Hawking and W. Israel presented an actual definition for HFGWs in a book [83, p. 98]. They suggested HFGWs have frequencies in excess of 100 kHz.

In Germany, Professor Heinz Dehnen was developing another HFGW generator, which made use of an array of crystal oscillators. Dehnen concluded that utilizing the relatively large crystal oscillators then available, the generated HFGWs would be too weak to be of value. Giorgio Fontana in Italy had been studying another possible HFGE laboratory generator the HFGW of a Laser that he termed a “Gazer.” Different from the LFGW research funding, all of this pre-2000 HFGW research was accomplished without funding by major foundations or agencies [16, 17].

One of the first practical HFGW detectors was developed at Birmingham University, England by Professor Mike Cruise and his graduate student Richard Ingleby. Professor Cruise published research during the 1990s on an electromagnetic detector for very-

<sup>2</sup> See paper [87] in this issue.



**Fig. 2.** The Cruise-Ingle Birmingham University HFGW Detector. (Photo by Robert M L Baker, Jr., during visit in 2003)



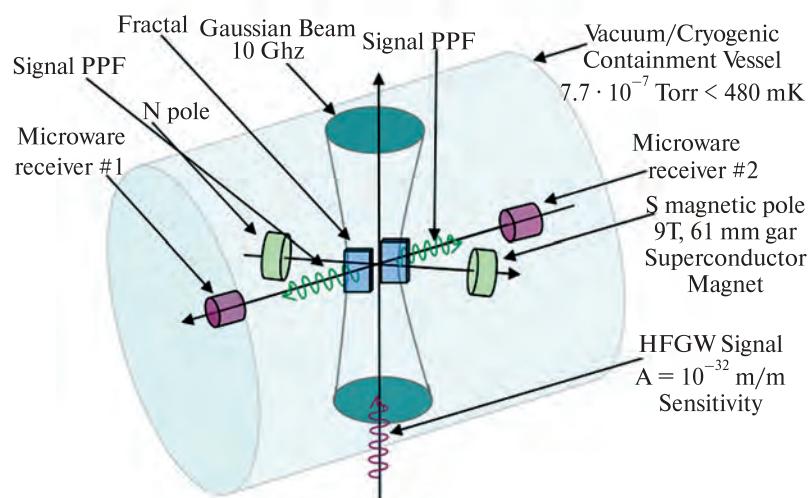
**Fig. 3.** The Blair Parametric Transducer Gravitational Wave Detector Component. (Photo by D. G. Blair)

high-frequency gravitational waves in “Class. Quantum Gravity” in 2000. Professor Cruise has published over 100 research papers and a textbook on “*The Principles of Space Instrument Design*”. He is a member of the European Space Agency and a member of international teams searching for gravitational waves using ground based and space based facilities such as

LIGO and the proposed Laser Interferometer Space Antenna (LISA). An interaction between a gravitational wave and the polarization vector of an electromagnetic (EM) wave is the basis for the Cruise-Ingle Birmingham HFGW detector. The polarization vector of the EM wave rotates about the direction of its propagation. If a resonant condition can be established with the EM wave always experiencing the same phase as the gravitational wave, then the effect is cumulative and can be enhanced linearly by repeated circuits of a closed loop. The detector measures changes in the polarization, using a short filament or probe, of the EM microwave beam (indicating the presence of a HFGW) propagating within a waveguide loop about one meter in diameter. This is about the wavelength of 300 MHz HFGWs [18–23]. A pair of the Cruise-Ingle HFGW detector loops is shown in Fig. 2.

Another of the early HFGW detectors was also developed in 1990s on the other side of our planet, in Australia, by the gravitational wave pioneer Professor David G. Blair [24–25]. It is a Parametric Transducer device that is essentially gravitational-wave antenna and in many ways similar to the Weber Bar detector. A view of the double transducer component is exhibited in Fig. 3. It is expected to be sensitive to HFGWs having space-time maximum fractional deformations or strain of  $A \sim 1 \times 10^{-20}/\sqrt{\text{Hz}}$  meters per meter.

There was, however, no real acceptance of gravitational waves in the scientific community until some observations were made from the Arecibo Radio-Astronomy telescope in Puerto Rico in the 1970s of binary pulsar 1913+16. They were made by Joseph H. Taylor and his graduate student, Russell H. Hulse, and led to the indirect verification of gravitational waves and their being awarded the 1993 Nobel Prize. Now GW research began to flourish. The Nobel Prize legitimized the existence of gravitational waves. This acceptance led Kip Thorne and others, especially Ronald W. P. Drever, both from Caltech, to promote the Laser Interferometer Gravitational Observatory or LIGO low-frequency gravitational-wave detector with the US National Science Foundation. LIGO was developed to detect the intense gravitational waves theoretically generated by the merger of a binary pair of black holes [11, 26–28].



**Fig. 4.** Notional Drawing of Li-Baker HFGW Detector concept drawing by author

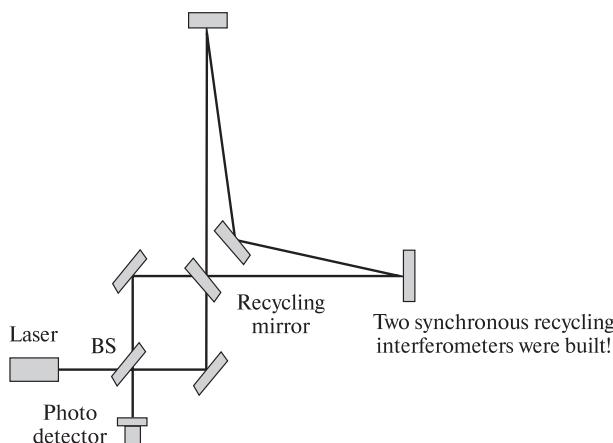
We remind that the High-Temperature Super-Conductor (HTSC) generator proposed by Giorgio Fontana from Italy is based upon the previously mentioned Halpern and Laurent studies and "...the properties of cooper-pair pairing states ..." [29, 30].

At this point in history let us pause and consider the state of Gravitational-Wave science at the turn of the Century, 2000. In the United States, as funded by the US National Science Foundation, the California Institute of Technology and other top institutions such as the Massachusetts Institute of Technology were actively pursuing the design and construction of the LFGW detector, LIGO. In England the first practical HFGW detector was under development by Professor Mike Cruise and his graduate student Richard Ingleby. And in Australia Professor David G. Blair was actively involved in gravitational-wave research. I contacted the US National Security Agency (Hendge G., written communication from the United States National Security Agency to Robert M. L. Baker, Jr., dated on January 19, 2000). In Russia the top scientists had accomplished considerable HFGW research, especially concerning the "Gravitational-wave Hertz" experiment, the concept of the laboratory generation and detection of HFGWs. In Germany, Heinz Dehnen was analyzing a crystal-oscillator laboratory HFGW generator or transmitter. In Italy, Giorgio Fontana was analyzing a "HTSC Gazer," initially suggested by Halpern and Laurent, to generate HFGWs in the laboratory. Massimo Gio-

vannini and others were continuing their research into the early universe generation of HFGWs. Fangyu Li had completed studies with Valentin Rudenko at the Sternberg Institute of Moscow State University.

In China Dr. Li had accomplished research into the Li-Effect in which HFGWs in a Gaussian electromagnetic field and an intense magnetic field could allow for the detection of HFGWs. This detector, termed the Li-Baker HFGW Detector, is under initial development in China at Chongqing University (see, Fig. 4).

For comparison of the Li-Effect with the (inverse) Gertsenshtein-Effect detectors, there is no laboratory-generated electromagnetic wave in the Gertsenshtein and, as previously mentioned, the Gertsenshtein Effect is extremely small and, as the JASON Report confirmed, has no value for HFGW detection. As of 2016, the Li-Baker detector is under development by Chongqing University in China, High-magnetic-field Center of Chinese Academy of Science (construction of high-strength, super conducting magnetic field element of figure 10-9(b)) and Southwest Jiaotong University in China. So far, the Li-Baker would be theoretically the most sensitive detector of weak HFGW's signal exhibiting an expected sensitivity of  $10^{-32}$  meters per meter maximum amplitude strain in the mat of space-time (as determined by the analyses of Professor R. Clive Woods and others published in a 2011 edition of the "Journal of Modern Physics" [30]). With the super-



**Fig. 5.** Astronomical Observatory of Japan HFGW Detector

conductor magnetic field on, both noise and the signal perturbative photon flux (signal PPF) photons caused by the interaction of Gaussian-beam and co-incident HFGWs (Li-effect) are detected at microwave detectors #1 and #2 (Fig. 4). With the magnetic field off only noise photons are detected. The difference between these detected photons then signals the presence of HFGWs. A basic problem is, as usual, noise – especially standard-quantum-limit noise inherent in the observation process itself caused by “quantum back action.” Since, according to Heisenberg uncertainty, the photons involved in the observation themselves change what is being observed (slightly changing the geometry and/or time of arrival of signal PPF photons or slightly “moving” or “hitting against” what is being observed, so it is not where it was when it was observed) and are also noise sources.

The 100 MHz HFGW detector of the Astronomical Observatory of Japan, Fig. 5, had been built and reported on later in an article in the “Phys. Rev. D” [31]. It consists of two synchronous interferometers with arm lengths of 75 cm. Its maximum amplitude sensitivity was about  $10^{-16}/\sqrt{\text{Hz}}$  meters per meter.

By the way, HFGWs cannot be detected by large-scale interferometer devices such as LIGO, Virgo or the proposed Laser Interferometer Space Antenna (LISA). According to one of the initial designers of LIGO, Peter Sven Shawhan, “at higher frequencies (above a kilohertz) the quantum nature of the laser beam (made up of discrete photons, albeit a large number of them) limits the precision of the measure-

ments. Increased laser power would reduce the problem of quantum noise, but ultimately, the LIGO (and like) interferometers are not suited to measuring gravitational waves that stretch or shrink the arms much more rapidly than the time a photon typically remains in the optical cavity (laser arm), which is roughly a millisecond for these (long) interferometers (or approximately a one-kilocycle frequency limit)...” [32]. LISA would be even less sensitivity to HFGWs, due to very much longer laser arms.

By 2000, research was picking up concerning detection of the LFGWs (funded by almost half a Billion dollars from the U S National Science Foundation), for LIGO for the detection of LFGWs most probably (theoretically) produced by the merger of black holes. To a far lesser, to an almost negligible degree, research on the HFGWs, most probably (also theoretically) produced by the early Universe or Big Bang, was continuing especially in China. As a portent of things to come, the very first patent specifically concerning HFGWs was filed in 1999, United States Patent Number 6,160,336, “Peak Power Energy Storage Device and Gravitational Wave Generator”, including its continuation in part, “Gravitational Wave Generator,” United States Patent Number 6,417,5971 B1 and “Gravitational Wave Generator Utilizing Submicroscopic Energizable Elements,” United States Patent Number 6784591 B2. (Another related patent was Peoples Republic of China Patent Number 01814223.0, “Gravitational Wave Detector,” filed July 13, 2001.)<sup>3</sup> Although HFGW research was encouraged by such important person as Buzz Aldrin, at the turn of the Century there had been no

<sup>3</sup> After a rather long breather from my 1961 interest, a business associate of mine (not a scientist) Fred Noble and I filed that very first Patent Application for a GW generator in the world (now granted as United States Patent 6,160,336) on November 19, 1999. (Joseph Weber had a patent on an “Electromagnetic Coupled Detection of Dynamic Gravitational Force Gradients,” United States Patent 3,722,288, filed in 1969, but it was unrelated to GWs). And then I was awarded United States Patent Number 6,417,597, for a “Gravitational Wave Generator,” filed July 14, 2000. After achieving patent protection, I presented a paper entitled “Preliminary Tests of Fundamental Concepts Associated with Gravitational-Wave Spacecraft Propulsion,” at the American Institute of Aeronautics and Astronautics: Space 2000 Conference and Exposition (Paper Number 2000-5250, September 20).

actual detection of gravitational waves of any frequency to inspire the scientific community.

Although there was no significant funding available for HFGW research, Paul Murad was able to organize the first HFGW Conference or Workshop at The MITRE Corporation in McLean, Virginia, USA, May 6–9, 2003<sup>4</sup>. The second HFGW International Workshop was organized by Eric Davis at the Institute of Advanced Studies at Austin (IASA), Texas, USA during September 17–20, 2007. Papers were presented by most of the attendees including Fangyu Li, Valentin Rudenko, Leonid Grishchuk, Gary Stephenson, Giorgio Fontana, and Clive Woods [33–37]. The Third International High-Frequency Gravitational Wave Workshop was held in Chengdu, China, April 7–9, 2017, and was attended by about 60 scientists, mostly from China.

After the 2nd HFGW Workshop on June 17, 2008, a research group called the JASONs, composed of very influential and respected university scientists, was given a briefing on the generation, detection and applications of high-frequency gravitational waves. The JASON Report (JSR-08-506) on that briefing was published in October, 2008. The Report was widely distributed to the US scientific community and various press organizations reported it. The JASON Report stated that “Our main conclusions are that the proposed applications of the science of HFGW are fundamentally wrong; that there can be no secu-

<sup>4</sup> In 2002 I traveled to Europe to present my HFGW ideas to John Miller (a famous astrophysicist, who worked with Steven Hawking) at the International School for Advanced Studies in Trieste, Italy; Mike Cruise, Dean of Science at Birmingham University, England (viewed his and Richard Ingley's HFGW Detector); Professor Giorgio Fontana of the University of Trento, Italy (viewed the INFN HFGW Detector); Harald Dimmelmeier, the Max Planck Institute in Munich, Germany; and several scientists at INFN Genoa, Italy. At the last two meetings I delivered a lecture on HFGWs and recommended that an HFGW Working Group meeting be held early next year (2003) “...in order to trade ideas, stimulate thinking and define experimental parameters”. After considerable work with Paul Murad, the Gravitational Wave Conference [International High-Frequency Wave (HFGW) Working Group] was organized for 2003 and Paul and I were co-chairs with Ning Li as a honorary co-chair. The Conference was dedicated to Robert Lull Forward who can be considered as the person who coined the term High-Frequency Gravitational Waves. The meeting attracted over 50 scientists from 14 countries and some 25 technical papers were presented.

rity threat; and that independent scientific and technical vetting of such hypothetical threats is generally necessary. We conclude that previous analysis of the Li-Baker detector concept is incorrect by many orders of magnitude...” The author of the JASON Report's basic premise for generating HFGWs was:

“A basic mechanism for generating a HFGW is the direct conversion of an electromagnetic wave into a gravitational one of the same frequency by a strong static magnetic field. This Gertsenshtein process is idealized in Fig. 3.” In addition the Report states: “Proposed HFGW detectors have generally been based upon versions of the inverse Gertsenshtein process” (Italics added by the author for emphasis). These statements are both incorrect. As already mentioned, the Gertsenshtein process or effect was published in 1962 [9]. The effect is extremely weak and is not utilized in most of the modern HFGW generation, detection or applications.

In spite of the flawed JASON Report, others continued with HFGW research such as Gloria Garcia-Cuadrado in Spain and Professor R. Clive Woods now at the University of South Alabama and Christine S. Black who studied the HFGW radiation pattern [38–46]. Largely unaffected by the flawed JASON Report, research continued on relic HFGWs in Europe. The theme of the relic or Big-Bang generated HFGWs in the microwave band ( $\sim 10^8$ – $10^{11}$  Hz) was predicted by the quintessential inflationary models (QIM) of the early Universe by Massimo Giovannini [47–49], the Pre-Big Bang Scenario (PBBS) and some string cosmology scenarios [50–53]. These publications suggested HFGW random signals, and that the root-mean-square (rms) values of their dimensionless strain amplitudes might reach up to  $\sim 10^{-30}$ – $10^{-33}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Because of their weakness and very high-frequency properties, such so-called “relic” GW waves are quite different from low-frequency GWs for which the laser GW detectors, such as LIGO, were expected to detect. Although the relic GWs have not been detected yet, according to Massimo Giovannini, we can be reasonably sure that the Earth is bathed in a sea of these relic HFGWs. Since 1978 such relic and primordial background HFGWs have been of ever increasing scientific interest as many researchers have shown [54–62]. In fact, the possible early Universe conception of giant black

holes by the direct collapse of primordial gas clouds, suggested recently by Sokol [69] could be studied by the analyses of relic HFGWs.

Based on high-dimensional (termed “bulk”) space-time theories, it has also theoretically been shown by Massimo Giovannini and others, that all familiar matter fields are constrained to “live” on our three-dimensional, space-membrane or four-dimensional space-time membrane (for short “brane”) world, while gravity is free to propagate in the extra dimensions, and the HFGWs (i.e., high-energy gravitons) would be more capable of carrying energy from our brane world than lower-frequency LFGWs. It is noted that propagation of the HFGWs may be a unique and effective way for exchanging energy and information between two adjacent parallel brane worlds or between “parallel universes”. Moreover, if the pre-Big Bang scenario is correct, then the relic HFGWs would be an almost unique window from which one can look back into the early universe before the Big Bang. Although these theories and scenarios may be controversial and whether or not they include a fatal flaw remains to be determined. The successful detection of the HFGWs will certainly shed light on many of these theories. Also Einstein tells us that nothing in the Universe, light, gravitational waves, information in general, can exceed the speed of light. The ticking rate of the fast or slow clocks is here suggested to be related not only to time dilatation between moving frames of reference in Special Relativity, the strength of the gravitational field in General Relativity [63] where clocks in both cases move slowly, but also the speed of time may be related to the value of time itself. During a possible inflation of the early Universe (time is just getting started), clocks there might need to be very “fast” in order for the “material” of the early, rapidly inflating, Universe not to exceed the speed of light. Possibly clocks are still very slightly slowing down<sup>5</sup> after the Big Bang. There is considerable debate concerning the foregoing remarks. Since the early Universe may have been

in relatively rapid motion, gravitational waves of high frequency may have been generated. Thus the detection of high-frequency gravitational waves could reveal the truth.

As already noted, Professor Fangyu Li has published more than sixty peer-reviewed papers concerning gravitational waves in internationally recognized scientific journals with coauthors such as Zhenyun Fang (see, for example, [64–67]). I will rely primarily on his presentations for the remainder of my remarks. Li considers HFGWs having frequencies above one MHz and lists the following effects that may generate HFGWs naturally: “For GW frequencies greater than 1 MHz: Cosmological signals from Planck era; K-K gravitons from brane oscillations in higher dimensions; interaction of astrophysical plasma with EM waves and Gamma bursts of magnetars. In order to understand the importance of HFGWs to cosmology it is important to understand the development of our Universe. It is also important to realize how quickly the early Universe developed, in about  $10^{-42}$  to  $10^{-34}$  seconds for the early “construction” phases and, as previously mentioned, that HFGWs emerged before regular electromagnetic waves such as light was radiated.

Einstein stated “The only reason for time is so that

---

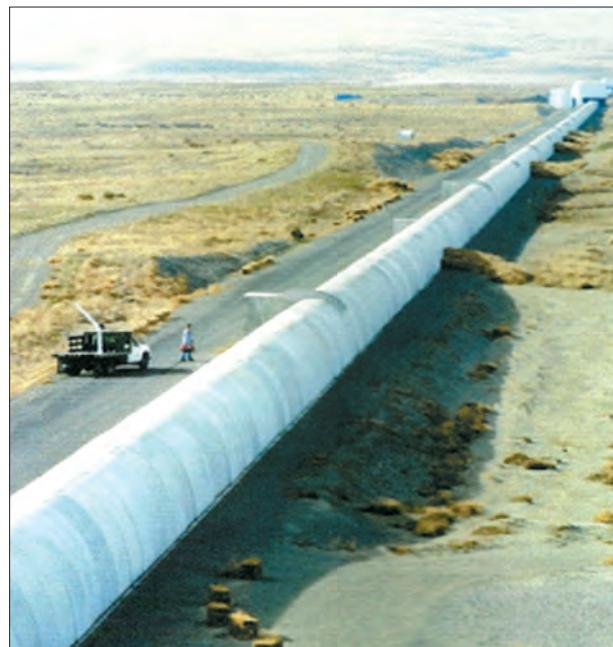
cording Barbour “Occam’s razor tells us to avoid redundant elements. All we need are differences. Indeed, the passage of time is always marked by difference, ...” Suppose you are a trainer of a runner who you just measured as doing a four-minute mile. Another trainer says that cannot be correct. “Your runner could not have improved that much, your stopwatch must be running slow since we all measured that he only ran a five-minute mile last year.” Well, you argue “No, he has not improved at all, he ran at the same *intrinsic* speed as last year. You all had stopwatches that were running fast and miss-measured my runner’s speed last year!” In this case last year’s stopwatches were moving  $5 \text{ minutes}/4 \text{ minutes} = 1.25 \text{ minutes}/\text{minute}$  times faster. Is there a way to establish that clocks (stopwatches) were moving with higher “speed” in the past? Essentially, an experiment may **not** be required. If there is a nuclear or molecular transient time (like Muon decay) that has been measured accurately by atomic clocks, then one should examine records and determine if a statistically significant reduction of the transient, e.g., Muon decay time (or, hypothetically, a runner’s time to run a mile) over several years has occurred. If so, then their atomic clock “stop watches” must have been all running fast in the past and the speed of time was different and these clocks are still very slightly slowing down now after the Big Bang. Please see Section XVII of [86].

<sup>5</sup> (According to Julian Barbour [85]): “Clocks are useless if they do not march in step for otherwise we cannot keep appointments. Therefore it is not a clock that we must define but clocks and the correlations between them as expressed in the marching-in-step criterion.” But when they do not march in step that is where time as a “duration” becomes interesting. Again ac-

everything doesn't happen at once". It should be added that the only reason for space is that everything doesn't happen at one place – except, perhaps, at the beginning of a universe. There is a problem here. As Philip Ball [68] writes "... two particles *A* and *B* that have been prepared with ... 'entangled' properties ... for example if *A* has an upward pointing spin ... then *B* must be down and vice versa ... That means if one changes the spin on *A* it also (instantly) fixes the state of the entangled partner *B* – however far away that partner is". Here's a practical application: we want to have advance warning that the Klingons are attacking; so we entangle two electrons, keep one here at Space-command and have a Starship with the other several light years away. If the Klingons are spotted, then the Starship flips its electron's spin. The other entangled electron also instantly flips and Space-command is immediately alerted to the Klingon attack! But according to Einstein's special relativity, nothing (no information) can move faster than the speed of light, *c*. So maybe the effects of *A* and *B* are determined by some other event acting on them both — a "bridge" of time perhaps. HFGW research may help define that bridge. (Andrew Beckwith, "...quantum teleportation... Einstein-Rosenstein Brige..." [69]).

Other cosmological researchers include the just quoted Professor Andrew Beckwith, internationally well-known cosmologist, Chongqing University [69–73], and Dr. Christian Corda's works on the "magnetic" component of gravitational waves and on the stochastic background of relic gravitational waves [74–78].

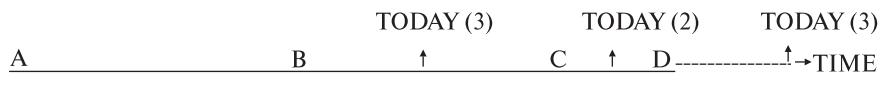
On the low-frequency end of the gravitational wave spectrum, LFGWs, an interesting source would be the merger of binary black holes. This is the motivation for the LIGO's development. In 1994, with a budget of USD 395 million, LIGO stood as the largest overall funded NSF project in history. The project broke ground at two locations: in Hanford, Washington, in late 1994 and in Livingston, Louisiana, in 1995. As construction neared completion in 1997, two organizational institutions were formed, LIGO Laboratory and LIGO Scientific Collaboration (LSC). The LIGO laboratory consists of the facilities supported by the NSF under LIGO Operation and Advanced R&D; this includes administration of the LIGO detector and test facilities. The LIGO Scientific Collaboration, composed of over one thousand



**Fig. 6.** Four kilometer long Laser Interferometer Gravitational Observatory (LIGO) vacuum chamber

scientists and engineers, is a forum for organizing technical and scientific research in LIGO. It is a separate organization from LIGO Laboratory with its own oversight. Initial LIGO operations between 2002 and 2010 did not detect any gravitational waves. In 2004 the funding and groundwork were laid for the next phase of LIGO development (called "Enhanced LIGO"). At this point the total funding for the LIGO Project reached in excess of onehalf a Billion dollars. This was followed by a multi-year shut-down while the detectors were replaced by much improved "Advanced LIGO" versions. By February 2015, after 21 years of R&D, the detectors were brought into engineering mode in both locations (Fig. 6).

By mid-September 2015 "the world's largest gravitational-wave facility" completed a 5-year US\$200-million overhaul at a total cost of \$620 million. On September 18, 2015, Advanced LIGO began its first formal science observations at about four times the sensitivity of the initial LIGO interferometers. Its sensitivity will be further enhanced until it reaches design sensitivity around 2021. On February 11, 2016, the LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration published



**Fig. 7.** Exoplanet advanced civilization time line or string, illustration by author

a paper about the detection of gravitational waves, from a signal detected at 09.51 UTC on 14 September 2015 of two  $\sim 30$  solar mass black holes merging about 1.3 billion light-years from Earth [79].

Since the sensitivity of the present LIGOs is relatively small, they cannot now detect most double-neutron-star pulsars directly. On the other hand, in theory one can utilize a superconducting microwave cavity coupled to the acoustic motion of a superfluid helium-4 (fluid of an isotope of helium that flows freely without viscosity) in the presence of a LFGW having a maximum amplitude of roughly  $10^{-24}$  m/m over a frequency range of 0.1 Hz to 1.500 Hz. (Singh, et al. [80]).

#### EXOPLANET APPLICATIONS OF HFGWS

Instead of conclusions on HFGW history, I would like to finish with several interesting perspectives concerning exoplanet applications of HFGWs. A comprehensive discussion can be found in my Book: “Gravitational Waves: the World of Tomorrow, a Primer, with Exercises, 3rd Printing, 2017. Our Galaxy (and there are 100 to 200 billion galaxies in our Universe) contains at least as many planets as stars and there are 200 to 500 billion stars per galaxy! Thus there may be as many as about  $200,000,000,000 \times 500,000,000,000 = 100,000,000,000,000,000,000,000$  ( $= 10^{23}$  or one followed by 23 zeroes or one hundred sextillion) Exoplanets out there! That does not mean that every star has a planet, but one may have 8 or 9 like our Sun, some may have none, some may have 12 or more, but on average assume one exoplanet per star. We should not rule out non-carbon based entities (e.g., Silicon based). In fact consciousness or intelligence might exist within stars or within any structure, even dark matter in the Universe; but for such “intelligence” to matter the ability to communicate is essential.

What might an Advanced Exoplanetary Being look like? Advanced Intelligent Civilizations May Include Communications with their Explorers. Homo sapiens

and advanced civilizations may have a mean time to failure built into their evolutionary processes (Fermi’s paradox). The Exoplanet Advances Civilization Time line with some explanation is given in Fig. 7. The Length of Time in Years between a Civilizations’ Emergence of Cyborgs, gene engineered beings and/or some kind of Interstellar Communication Capability and their Demise, C to D or  $d$  (from Fig. 7) is presented in Table 1. There is also conjecture about the inevitability or improbability of the likelihood of intelligent life actually forming in our Universe. As Adrian Woolfson writes [81] “Gene editing ... allowing us to expunge unfavorable aspects of ourselves – such as our susceptibility to diseases and aging – while enabling the introduction of more appealing features ... humanlike organisms would be a near inevitability ...”. Let us, however, assume the emergence of some exoplanets of long living electronic/biological or genetically engineered intelligent beings.

Thus up to C our civilization would have survived about 2000 to 4000 generations. Assuming our civilization is about to evolve rapidly into advanced gene engineered or biological/electronic beings i.e., cyborgs at C it is estimated (or “conjectured”) the longevity of our and other civilizations near us in our Galaxy to average about 400,000 years C to D. Various other alternatives are exhibited in Table 1. However, the demise of the advanced civilization might occur almost any time during the time interval between B and D. That is, during that time interval between B and D advanced civilizations could “blink” on at B and then off, that is reach its D. There are numerous values that could be chosen for these dates. Let us speculate that civilizations reach its D in a serial fashion. Of course, there could be overlap and the time spans would be quite randomly distributed. In order, however, to get some approximate numerical results simply assume that when one advanced civilization reaches its D (“blinks off”) another civilization reaches its C (“blinks on”). In the numerical example, the number of such intervals would be 3.6 billion years divided by 400,000 years or 9,000. By

**Table 1. The Length of Time in Years between a Civilizations' Emergence of Cyborgs, gene engineered beings and/or Interstellar Communication Capability and their Demise, C to D or  $d$  (from Fig. 7)**

Generation length, years	No. of Generations					
	1	4	40	400	4,000	40,000
25	25	100	1,000	10,000	100,000	1,000,000
100	100	400	4,000	40,000	400,000	4,000,000
1,000	1,000	4,000	40,000	400,000	4,000,000	40,000,000
10,000	10,000	40,000	400,000	4,000,000	40,000,000	$4 \times 10^8$
100,000	100,000	400,000	4,000,000	40,000,000	400,000,000	$4 \times 10^9$
1,000,000	1,000,000	4,000,000	40,000,000	400,000,000	4,000,000,000	$4 \times 10^{10}$

**Table 2. Number, N, of potential intercommunicating advanced civilizations as a function of the years between C to D or  $d$**

$d$ years between C to D	N
4,000	1.48
40,000	14,800
<b>400,000</b>	<b><math>1.48 \times 10^8</math></b>
4,000,000	$1.48 \times 10^{12}$
40,000,000	$1.48 \times 10^{16}$

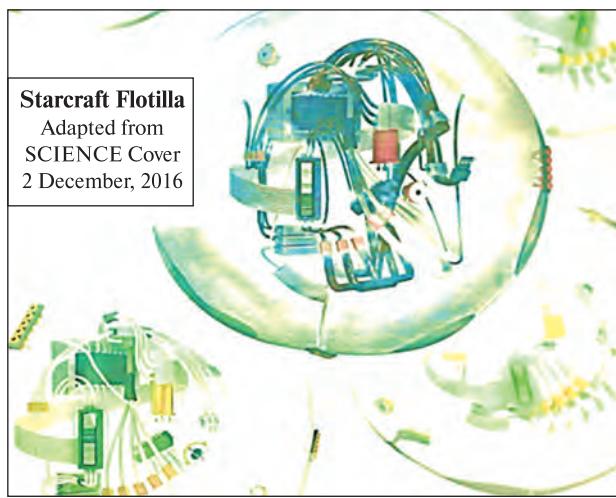
the way, only if TODAY were at TODAY (2) would a particular one of the 9,000 advanced civilizations have the opportunity for interstellar communication that could be intercepted by us. But only those Worlds that are clustered together close enough to communicate with each other in a time span less than 400,000 light years apart in the numerical example could communicate in time before their demise D. Let us suppose that the average distance apart of stars in our Galaxy is about five light years, so that minimum intercommunication time would average some  $2 \times 5 = 10$  years for this pair of close-by stellar exoplanetary systems.

**Potential Intercommunicating Civilizations.** In general, if we define  $d$  as the time interval C to D in years as found, for example, in the entries of Table 1, then given a 5 light year average distance apart of the stars and their advanced exoplanet civilizations in our neighborhood of the Universe, they could be  $S = (d/5)/2 = d/10$  stars away. In the numerical example  $S = 400,000/10 = 40,000$ . Thus the number,  $n$ , of such potentially intercommunicating civilizations in

the spherical volume of interstellar communicating exoplanet civilizations would be  $n = (4\pi/3) S^3$ , which is somewhat similar to the factor  $R^* \times f_p$  in the Drake equation.

**Number N of potential interstellar-communicating Exoplanets.** In the example,  $n = 2.68 \times 10^{14}$ . Of course, this number must be greatly reduced, which also will reduce the estimated number of the true potential intercommunicating advanced civilizations around Earth. Let us assume that on average only one out of ten exoplanets would be in the habitable zone between the freezing and boiling point of water (probably conservative because not all intelligent extraterrestrial life may need to be in this temperature range). Next, let us assume that only one out of ten of these habitable exoplanets will reach the advanced stage C. Finally, cut their number in half to account for very old and dead exoplanetary civilizations and then by dividing by the number of stars that have reached C but have not reached D or, in the numerical example, divided by  $2 \times 9000$ . So, under these arbitrarily parameters, the actual number  $N$  of potential interstellar-communicating Exoplanets is estimated to be  $N = 2.68 \times 10^{14} / 10 \times 10 \times 9000 = 1.485 \times 10^8$ .

Each intercommunicating advanced civilization may be comprised of thousands, if not millions, of independent interstellar transmitting/receiving individuals or cyborg entities. There are about three million independent radio operators or “hams” worldwide on our planet. Thus we are considering a minimum of intercommunications (see, Table 2).



**Fig. 8.** Small Spherical Starcraft

**Potential Frequency of Intercepts.** In the numerical example for the  $0.1d$  case there might be 550,000 possible messages to intercept each year or about 1500 per day. It is also interesting to note the distance of the stars/exoplanets in light years for  $0.1d$  and  $0.001d$ . These distances are, for the most part, in our Galaxy. Since HFGWs are not absorbed by interstellar material as are EM waves, an advanced civilization would choose HFGWs for interstellar and other communications purposes.

Can Interferometer GW Detectors like LISA detect the HFGW Exoplanet Intercommunications? The answer is still NO! Here again is the problem with higher frequencies: One has to “observe” the interference pattern between the LIGO legs caused by the passage of a gravitational wave. As Peter Sven Shawhan, a key member of the team that assembled and tested the original LIGO, stated, “At higher frequencies, the quantum nature of the laser beam (made of discrete photons, albeit a large number of them) limits the precision of the measurement. Increased laser power would reduce the problem of quantum noise, but ultimately the LIGO (and other) interferometers are not suited to measuring gravitational waves that stretch or shrink the arms much more rapidly than the time a photon typically remains in the optical cavity (the arms of the interferometers), which is roughly a millisecond for these (LIGO) interferometers.” A millisecond is one thousandths of a second and equivalent to 1000 cycles per

second or a kilohertz or  $10^3$  Hz. In a less technical fashion, the easiest explanation to understand the LIGO frequency limitation is to visualize old radio antennas and modern satellite-dish antennas. The former were utilized to detect rather long radio low-frequency waves and would often consist of a long antenna wire. The latter is utilized to detect very high-frequency microwaves and consist of relatively small satellite dishes. It would be impossible for a radio wire antenna to detect high-frequency microwaves, just as the LIGO “antenna” cannot detect high-frequency gravitational waves.

What are we going to do with the intercepted signal between Exoplanets? First, we must decode it. No doubt it will not be Morse Code. Probably not any kind of encryption that National Security Agency of the US can handle right away. As Richard Grey recently suggested: “...we may all one day speak telepathically so it may be brainwaves!” Second, what will we learn from the intercepted messages? Here is where mankind may have great benefit from learning what the messages are about and “tell” us how to improve our way of life. But, this intercept will also be a Cataclysmic Event and may even lead to religious and other turmoil on our little planet!

How shall we prepare? Conduct research in cryptography with special attention to the possible interception of “brain-wave” communications. Conduct research and development of high-frequency gravitational wave (HFGW) detectors or receivers.

**Application of High-Frequency Gravitational Waves to Interstellar Travel.** A HFGW alternative to the Starshot Project, suggested by Stephen Hawking to send a small Starship microchip to the nearest star, can be described briefly as follows. Instead of 100-gigawatt electromagnetic laser beams (“pushing” small microchip Starcraft) which are easily absorbed by interstellar material and Starcraft “solar sails” subject to ablation by such strong lasers, a few powerful HFGW beams, reflected by a possible Starcraft HFGW mirror, (hence a “pushing” force due to reflection) could be employed. The HFGW beams would not be intercepted by the Earth’s rotation or orbital motion since the Earth is transparent to GWs. HFGW frequency would be quite high in order to reduce GW beam widening due to diffraction. Such a HFGW mirror could propel the little GW Starcraft.



Robert M L Baker, Jr. and Yaroslav S. Yatskiv at the MAO NAS of Ukraine. April 17, 2017, Kiev (Photo by P. Berczik)

Upon reflection of the HFGW beam, when modulated by the HFGW StarCraft's mirror, the HFGWs could also serve as a return communications link.

The GW Starcraft might have a spherical rather than a planer chip form. It might be more like a Ping-Pong ball as in Fig. 8. The Ping-Pong ball's equatorial cross section would be occupied by the Starcraft's High Temperature Super Conductor (HTSC) mirror and the rest of this volume occupied by small HTSC magnets, various nano-electronics and attitude control mechanisms. There could well be a flotilla of such GW Starcraft launched together. According to R. Clive Woods, the pressure on an ideal HFGW reflector (if experimentally demonstrated that GWs are slowed in a high-temperature semiconductor or HTSC) would be:

$$p \text{ (N/m}^2\text{)} = 2 \sigma_E \text{ (J/m}^3\text{)},$$

where  $\sigma_E$  is the energy per unit volume contained in the HFGW. Specifically,

$$\sigma_E \text{ (J/m}^3\text{)} = S \text{ (W/m}^2\text{)}/c \text{ (m/s).}$$

For the more technical reader, a good background for High-Frequency Gravitational Wave study can also be found in my Book: "Gravitational Waves: the World of Tomorrow, a Primer, with Exercises, 3rd Printing" [84].

## GOAL

I believe that those interested in the research and development of High-Frequency Gravitational Waves should be guided by the LIGO approach for Low-Frequency Gravitational Waves. 625 million dollars and 21 years may not be necessary for HFGW Research and Development, but it is an interesting goal.

## COMMENTARY FROM DEPUTY-EDITOR-IN-CHIEF

On behalf of the Editor Board of the "Space Science and Technology" journal I am grateful to Robert M L Baker, Jr., for his permission to publish this paper. It includes two lectures, which Robert Baker presented at the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine on April 17, 2017, when he and his wife, Mrs. Bonnie Sue Baker, have visited Kiev.

## REFERENCES

1. *Poincaré Jules Henri. C.R. Ac. Sci., Paris, 140, 1504 (1905), and also appears in Oeuvres, Volume 9, p. 489, Gauthier-Villars, Paris, (1954).*
2. *Einstein A. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. Annalen der Physik, 49, 769–822 (1916).*
3. *Einstein A. Über Gravitationswellen. In: Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, 154–167 (Berlin, 1918).*
4. *Balbus S. A. Simplified derivation of the gravitational wave stress tensor from the linearized Einstein field equations (2016) arXiv.org > astro-ph > arXiv:1604.05974v2, https://arxiv.org/pdf/1604.05974.pdf*
5. *Einstein A., Rosen N. On Gravitational Waves. J. Franklin Institute, 223, 3–54 (1937).*
6. *Weinsteiin G. Einstein and Gravitational Waves 1936–1938. (2016), https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1602/1602.04674.pdf.*
7. *Weber J. Detection and generation of gravitational waves. Phys. Revw, 117 (N 1), 306–313 (1960).*
8. *Forward R. L., Baker R. M. L., Jr. "Gravitational Gradients, Gravitational Waves and the 'Weber Bar', " Lecture given at the Lockheed Astrodynamics Research Center, 650 N. Sepulveda Bel Air, California, USA,*

- November 16th, 1961 Lockheed Research Report RL 15210, based upon notes taken by Samuel Herrick a Lockheed Consultant (Forward coined the term "High-Frequency Gravitational Waves" and Baker suggested their use to monitor extraterrestrial intelligence communications) The lecture was based upon work with the Weber bar and gravity gradients: Joseph Weber (1960), "Detection and generation of gravitational waves," Physics Review, Volume 117, Number 1, pp.306–313. and W. B. Klemperer and Robert M. L. Baker, Jr., (1957). "Satellite Vibrations," Astronautica Acta 3, pp.16–27.
9. Gertsenshtain M. Wave resonance of light and gravitational waves. *Sov. Phys. JETP*, **14** (N 1), 84–85 (1962).
  10. Gertsenshtain M. E., Pustovoit V. I. On the detection of low frequency gravitational waves. *Sov. Phys. JETP*, **16**, 433–435 (1963).
  11. Abramovici A., Althouse W. E., Drever R. W. P., et al. LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, *Science*, **256**, 325–333 (1992).
  12. Halpern L. E., Laurent B. On the gravitational radiation of microscopic systems. *Il Nuovo Cimento*, **33** (N 3), 728–751 (1964).
  13. Grishchuk L. P., Sazhin M. V. Emission of gravitational waves by an electromagnetic cavity. *Sov. Phys. JETP*, **38** (N 2), 215–221 (1974).
  14. Chapline G. F., Nuckolls J., Woods L. L. *Phys. Revw D*, **10** (N 4), 1064–1065 (1974).
  15. Braginsky V. B., Rudenko V. N. Gravitational waves and the detection of gravitational radiation, [Section 7: "Generation of gravitational waves in the laboratory," Physics Report (Review section of Physics Letters), Volume 46, N 5, P. 165–200 (1978)].
  16. Dehnen H., Romero-Borja F. Generation of GHz – THz High-Frequency Gravitational Waves in the laboratory," paper HFGW-03-102, Gravitational-Wave Conference, The MITRE Corporation, May 6–9, P. 22 (2003), <http://www.gravwave.com/docs/Analysis%20of%20Lab%20HFGWs.pdf>
  17. Romero-Borja F., Dehnen H. Generation of gravitational radiation in the laboratory. *Z. Naturforsch*, **36a**, 948–955 (1981), <http://dx.doi.org/10.1515/zna-1981-0905>.
  18. Cruise A. M. An Interaction between gravitational and electromagnetic waves. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **204**, 485–482 (1983).
  19. Cruise A. M. An electromagnetic detector for very high-frequency gravitational waves. *Class. Quantum Grav.*, **17**, 2525–2530 (2000), <http://dx.doi.org/10.1088/0264-9381/17/12/006>
  20. Ingleby R. M. J., Cruise A. M. An electromagnetic detector for high frequency gravitational waves, 4th Edoardo Amaldi Conference (2001).
  21. Cruise A. M., Ingleby R. M. J. A correlation detector for very high frequency gravitational waves, *Class. Quantum Grav.*, **22**, 5479–5481 (2005).
  22. Cruise M. Operational Performance of the Birmingham 100 MHz Detector and Upper Limits on the Stochastic Background, Amaldi 7 Gravitational Wave Conference, July 9, 2007, Sydney, Australia (2007).
  23. Cruise M. Very High Frequency Gravitational Waves, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (GWADW), Elba Conference, 17 May, (2008), <https://indico.pi.infn.it/contributionDisplay.py?contribId=132&sessionId=13&confId=225>
  24. Tobar M. E., Blair D. G. Parametric transducers for resonant bar gravitational wave antenna. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **26**, 2276–2291 (1993).
  25. Blair D. G., et al. High Sensitivity Gravitational-Wave Antenna with Parametric Transducer Readout. *Phys. Rev. Lett.*, **74** (N 1), (1995).
  26. Hulse R. A., Taylor J. H. Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophys. J.*, **195**, L51 (1975).
  27. Esposito L. W., Harrison E. R. Properties of the Hulse-Taylor binary pulsar system. *Astrophys. J.*, **196**, L1–L2 (1975).
  28. Taylor J. H., Weisberg J. M. A new test of general relativity – gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913-16. *Astrophys. J.*, **253**, 908–920 (1982).
  29. Fontana G. A possibility of emission of high frequency gravitational radiation from junctions between d-wave and s-wave superconductors, Preprint, Faculty of Science, University of Trento, 38050 Povo (TN), Italy, pp. 1–8 (1998), <http://xxx.lanl.gov/html/cond-mat/9812070> See also Fontana G. High Temperature Superconductors as Quantum Sources of Gravitational Waves: the HTSC GASER. In: Modanese G, Robertson G. A., Eds. Gravity-Superconductors Interaction: Theory and Experiment. Bentham 2012; Ch. 3. G. Fontana, Directions for gravitational wave propulsion. *J. Space Expl.*, **1** (2012) FP8–FP16.
  30. R. Clive Woods, Robert M. L. Baker, Jr., Fangyu Li, Gary V. Stephenson, Eric W. Davis and Andrew W. Beckwith, "A new theoretical technique for the measurement of high-frequency relic gravitational waves." *J. Mod. Phys.*, **2** (N 6), 498–518 (2011). The Abstract is available at: <http://vixra.org/abs/1010.0062> and the manuscript is available at: <http://www.gravwave.com/docs/J.%20of%20Mod.%20Phys%202011.pdf>. <http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2011.26060>.
  31. Nishizawa Atsushi, Kawamura Seiji, Akutsu Tomotada, Arai Koji, Yamamoto Kazuhiro, Tatsumi Daisuke, Nishida Erina, Sakagami Masa-aki, Chiba Takeshi, Takahashi Ryuichi, and Sugiyama Naoshi. Laser-interferometric detectors for gravitational wave backgrounds at 100 MHz: Detector design and sensitivity. *Phys. Rev. D*, **77** (N 2), 022002 (2008) <http://dx.doi.org/PhysRevD.77.022002>.
  32. Shawhan P. S. Gravitational Waves and the Effort to Detect them." *Amer. Sci.*, **92** (4), 350–356 (2004).
  33. Davis Eric W. Laboratory generation of high-frequency gravitons via quantization of the coupled Maxwell-

- Einstein fields," paper HFGW-03-125, Gravitational-Wave Conference, The MITRE Corporation, May 6—9. (2003).
34. *Millis Marc G. and Davis Eric W.* Frontiers of Propulsion Science, Progress in Astronautics and Aeronautics Series, 227, Published by AIAA, 739 pages, ISBN-10: 1-56347-956-7 and ISBN-13: 978-1-56347-956-4 (2009).
35. *Stephenson Gary V.* The application of High-Frequency Gravitational Waves (HFGW) to communications," paper HFGW-03-104, Gravitational-Wave Conference, The MITRE Corporation, May 6—9 (2003).
36. *Stephenson Gary V.* Lessons for Energy Resonance HFGW Detector Designs Learned from Mass Resonance and Interferometric LFGW Detection Schemes," after Peer Review, accepted for Publication in the Proceedings of the Space, Propulsion and Energy (2009)
37. *Stephenson Gary V.* The Standard Quantum Limit for the Li-Baker HFGW Detector," after Peer Review, accepted for Publication in the Proceedings of the Space, Propulsion and Energy Sciences International Forum (SPESIF), 24—27 February, Edited by Glen Robertson. (Paper 023), American Institute of Physics Conference Proceedings, Melville, NY 1103, 542—547. Edited by Glen Robertson. (Paper 016), American Institute of Physics Conference Proceedings, Melville, NY 1103, pp. 532—541 (2009). <http://www.gravwave.com/docs/Detector%20Development.pdf>
38. *Garcia-Cuadrado G.* Towards a New Era in Gravitational Wave Detection: High Frequency Gravitational Wave Research," after peer review, accepted for publication in the Proceedings of the Space, Propulsion and Energy Sciences International Forum (SPESIF), 24—27 February, Edited by Glen Robertson. (Paper 038), American Institute of Physics Conference Proceedings, Melville, NY 1103, 553—563 (2009). Please visit Internet site: <http://www.gravwave.com/docs/Toward%20a%20New%20Era%20in%20Gravitational%20Wave%20Research.pdf>
39. *Corda Ch., Fontana G., Garcia-Cuadrado G.* Gravitational Waves in the Hyperspace: a Critical Review," After Peer Review, Accepted for Publication in the Proceedings of the Space, Propulsion and Energy Sciences International Forum (SPESIF2009), 24—27 February, Edited by Glen Robertson. (Paper 027), American Institute of Physics Conference Proceedings, Melville, NY 1103 (2009).
40. *Woods R. C.* Comments on 'A gravitational shielding based upon ZnS:Ag phosphor' and 'The gravitational mass at the superconducting state,' Los Alamos National Laboratory Archive physics/0204031 (2002).
41. *Woods R. C.* Manipulation of gravitational waves for communications applications using superconductors. Phys. C, **433**, 101—107 (2005).
42. *Woods C., Baker R. M. L., Jr.* Gravitational Wave Generation and Detection Using Acoustic Resonators and Coupled Resonance Chambers," in the proceedings of Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2005), edited by M.S. El-Genk, American Institute of Physics Conference Proceedings, Melville, NY 746, 1298 (2005).
43. *Woods R. C.* Modified Design of Novel Variable-Focus Lens for VHFGW," Discussion-Focus Paper 3.1, 2nd HFGW International Workshop, Institute for Advanced Studies at Austin (IASA), Texas, September 19—21(2007); <http://www.gravwave.com/docs/AIP;%20HFGW%20Optics.pdf>
44. *Woods R. C., Baker, R. M. L., Jr., Li F., Stephenson G. V., Davis E. W., Beckwith A. W.* A new theoretical technique for the measurement of high-frequency relic gravitational waves. J. Mod. Phys., **2** (N 6), 498—518 (2011). The Abstract is available at: <http://vixra.org/abs/1010.0062> and the manuscript is available at: <http://www.gravwave.com/docs/J.%20of%20Mod.%20Phys%202011.pdf>. <http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2011.26060> .
45. *Woods R. C., Baker R. M. L. Jr.* Generalized Generators of Very-High-Frequency Gravitational Waves Including Ring/Cylinder Devices," After Peer Review, Accepted for Publication in the Proceedings of the Space, Propulsion and Energy Sciences International Forum (SPESIF), 24—27 February, Edited by Glen Robertson. (Paper 001), American Institute of Physics Conference Proceedings, Melville, NY 1103, 515—523 (2009).
46. *Baker R. M. L., Jr., Black C. S.* Radiation Pattern for a Multiple-Element HFGW Generator, After Peer Review, Accepted for Publication in the Proceedings of the Space, Propulsion and Energy Sciences International Forum (SPESIF), 24—27 February, Edited by Glen Robertson. 3rd High-Frequency Gravitational Wave Workshop (Paper 035), American Institute of Physics Conference Proceedings, Melville, NY 1103, 582—590 (2009).
47. *Giovannini M. Phys. Rev. D*, **60**, 123, 511 (1999).
48. *Giovannini M. Class. Quantum Grav.*, **16**, 2905 (1999).
49. *Riazuelo A., Uzan J. P. Phys. Rev. D*, **62**, 083, 506 (2000).
50. *Lidsey J. E. et al. Phys. Rep.*, **337**, 343 (2000).
51. *Copeland E. J. et al.* gr-qc/9803070.
52. *Gasperini M., Veneziano G. Phys. Rep.*, **373**, 1 (2003).
53. *Veneziano G. Sci. Am.*, **290**, 30 (2004).
54. *Grishchuk L. P.* gr-qc/0002035.
55. *Grishchuk L. P.* gr-qc/0305051.
56. *Grishchuk L. P.* gr-qc/0504018.
57. *Gorkavyi N. N.* Paper HFGW-03-115, In: High-Frequency Gravitational Waves Conference, ed. by P. Murad, R. M. L. Baker Jr. (MITRE Corporation, Mclean, VA, USA (2003).
58. *Bisnovatyi-Kogan G. S., Rudenko V. N.* Very high frequency gravitational wave background in the universe. Class. Quantum Grav., **21**, 3344—3359 (2004).

59. Zhang Y., Yuan Y., Zhao W., Chen Y. T. Class. Quantum Grav., 1383 (2005).
60. Randall L., Sundrum R. Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension. *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 17, 3370—3373 (1999).
61. Randall L., Sundrum R. An Alternative to Compactification. *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 4690—4693 (1999).
62. Sokol J. Observations hint at a new recipe for giant black holes. *Science*, **355**, 120 (2017).
63. Margalit Y. et al. *Science*, **349**, 1205—1208 (2017).
64. Li Fang-Yu., Tang Meng-Xi. Positive Definite Problem of Energy Density and Radiative Energy Flux for Pulse Cylindrical Gravitational wave. *Acta Phys. Sinca*, **6** (N 5), 321—333 (1997).
65. Li Fang-Yu., Tang Meng-Xi, Luo Jun, Li Yi-Chuan. Electrodynamical response of a high energy photon flux to a gravitational wave. *Phys. Revw D*, **62**, 044018-1 to 044018 -9 (2000).
66. Li Fang-Yu., Tang Meng-Xi, Shi Dong-Ping. Electromagnetic response for High-Frequency Gravitational Waves in the GHz to THz band, paper HFGW-03-108, Gravitational-Wave Conference, The MITRE Corporation, May 6—9 (2003).
67. Li Fang-Yu., Yang Nan. Resonant interaction between a weak gravitational wave and a microwave beam in the double polarized states through a static magnetic field. *China Phys. Lett.*, **21** (N 11), 2113 (2004).
68. Philip Ball. A World Without Cause and Effect. *Nature*, **546**, 590—592 (2017).
69. Beckwith Andrew W. J. High Energy Phys., *Gravitation and Cosmology*, **3** (N 4), (2017).
70. Beckwith Andrew W. HFGW and the search for relic gravitons / entropy increase from the early universe, Proceedings of the Space, Propulsion and Energy Sciences International Forum (SPESIF 2010), February 23—26, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, MD, U.S.A., Edited by Glen Robertson, American Institute of Physics Conference Proceedings, Melville. NY, USA, 1208 (2010).
71. Beckwith Andrew W. Relic High Frequency Gravitational Waves, Neutrino Physics, and Icecube, After Peer Review, Accepted for Publication in the Proceedings of the Space, Propulsion and Energy Sciences International Forum (SPESIF), 24—27 February, Edited by Glen Robertson. (Paper 003), American Institute of Physics Conference Proceedings, Melville, NY 1103, P. 564—570 (2009).
72. Beckwith A.W. Several routes for determining entropy generation in the early universe, links to CMBR spectra, and relic neutrino production, Presented at 6<sup>th</sup> International Conference on Gravitation and Cosmology (ICGC-2007), Ganeshkhind, Pune, India, 17—21 Dec 2007 and 43rd Rencontres de Moriond: Cosmology, La Thuile, Italy, 15-22 Mar 2008 and 23rd International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2008), Christchurch, New Zealand, 26—31 May 2008. e-Print: arXiv:0712.0029 (2007).
73. Beckwith Andrew W. Implications for the Cosmological Landscape: Can Thermal Inputs from a Prior Universe Account for Relic Graviton Production? In the proceedings of Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2008), edited by M.S. El-Genk, American Institute of Physics Conference Proceedings, Melville, NY 969, P.1091 (2008).
74. Corda Christian. Primordial Gravity's Breath. *Electronic J. Theor. Phys.*, **9**, 26, 1—10 (2012). <http://arxiv.org/abs/1110.1772>
75. Corda Christian. Information on the inflation field from the spectrum of relic gravitational waves. *General Relativity and Gravitation*, **42**, 5, 1323—1333 (2010).
76. Corda Christian. Tuning the Stochastic Background of Gravitational Waves Using the WMAP Data. *Mod. Phys. Lett. A*, **22** (N 16), 1167—1173 (2007).
77. Corda Christian. Fontana Giorgio and Garcia Cuadrado Gloria Gravitational Waves in Hyperspace. *Mod. Phys. Ltrs. B*, **24** (N 8), 575—582 (2009).
78. Corda Christian. Tuning the Stochastic Background of Gravitational Waves Using the WMAP Data, *Mod .Phys. Lett. A*, **22** (N 16), 1167—1173 (2007).
79. Abbott B. P. et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Phys. Revw Lett.*, **116**, 061102-1 to -16. February 11 (2016). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.116061102>.
80. Singh S. et al. Detecting continuous gravitational waves with superfluid He-4. *New J. Phys.*, **19**, 073023 (2017).
81. Adrian Woolfson. Inevitable or improbable? *Nature*, **357** (N 6349), 362 (2017).
82. Yatskiv Ya. S., Alexandrov A. N., Vavilova I. B., Zhdanov V. I., Kudrya Yu. N., Parnovsky S. L., Fedorova O. V., Khmil S. V. General Relativity theory: tests through time, 288 p. (Akademperiodyka, Kyiv, 2005).
83. Hawking W., Israel W. General Relativity — An Einstein centenary survey. (Cambridge University Press, 1979).
84. Baker R. M. L., Jr. Gravitational Waves: the World of Tomorrow, a Primer, with Exercises, 3rd Printing , Infinity Press, 2016.
85. Barbour J. The nature of time, arXiv:0903.3489v1, (2009).
86. Beckwith A. W. “History lessons from the 5th Solvay meeting, 1927,” Chongqing University Department of Physics Report for the 27th Solvay Conference in Physics, International Solvay Institutes. <http://www.gravwave.com/docs/Beckwith%20 282017%29%20 History%20 lessons%20 from%20 the%20 205th%20Solvay%20meeting.pdf>
87. Yatskiv Ya. S., Vavilova I. B., Romanets O. A., Savchuk V. S. Some little-known facts and events from the history of gravitational wave research in Ukraine. *Kosm. nauka tehnol.* **23**(3): 64—72 (2017).

*Received 17.04.17*

*P. M. Л. Бейкер*

Транспортна наукова корпорація, США

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ  
ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ  
ТА ЇХНЕ ВИКОРИСТАННЯ  
ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ЕКЗОПЛАНЕТ**

Вперше обговорюється історія досліджень високочастотних гравітаційних (ВЧГХ, HFGW). Упродовж багатьох років, починаючи з першої згадки Пуанкарє в 1905 р. про гравітаційні хвилі та пропозиції його назви Робертом Л. Форвардом в 1961 р., відбувається жвава дискусія щодо міжнародних дослідницьких зусиль зареєструвати високочастотні гравітаційні хвилі. У статті висвітлені досягнення дослідників з Китаю, Росії, України, Англії, Австралії, Японії, Німеччини, Іспанії, Італії та США. Проводиться порівняння з дослідженнями низькочастотних гравітаційних хвиль (НЧГХ, LFGW), особливо за допомогою Лазерної інтерферометричної гравітаційної обсерваторії (ЛІГО, LIGO). Також подано декілька цікавих перспективних проектів використань високочастотних гравітаційних хвиль для завдань космології, проблем швидкості часу та, особливо, досліджень екзопланет.

**Ключові слова:** гравітаційні хвилі, високочастотні гравітаційні хвилі, HFGWs, детектори HFGW, швидкість часу, екзопланети, LIGO, Starshot.

*P. M. Л. Бейкер*

Транспортная научная корпорация, США

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ  
ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН  
И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ**

Впервые обсуждается история исследований высокочастотных гравитационных волн (ВЧГВ, HFGW). На протяжении многих лет, начиная с первого упоминания Пуанкаре в 1905 г. о гравитационных волнах и предложения его названия Робертом Л. Форвардом в 1961 г., идет оживленная дискуссия относительно международных исследовательских усилий зарегистрировать высокочастотные гравитационные волны. В статье освещены достижения исследователей из Китая, России, Украины, Англии, Австралии, Японии, Германии, Испании, Италии и США. Проводится сравнение с исследованиями низкочастотных гравитационных волн (НЧГВ, LFGW), особенно с помощью Лазерной интерферометрической гравитационной обсерватории (ЛИГО, LIGO). Также представлены несколько перспективных проектов использования высокочастотных гравитационных волн для задач космологии, проблем скорости времени и, особенно, для исследований экзопланет.

**Ключевые слова:** гравитационные волны, высокочастотные гравитационные волны, HFGWs, детекторы HFGW, скорость времени, экзопланеты, LIGO, Starshot.

---

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.03.064>

UDC 530.12:531.514

**Ya. S. Yatskiv<sup>1</sup>, I. B. Vavilova<sup>1</sup>, O. A. Romanets<sup>2</sup>, V. S. Savchuk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Oles Honchar National University of Dnipropetrovsk, Dnipro, Ukraine

## **SOME LITTLE-KNOWN FACTS AND EVENTS FROM THE HISTORY OF GRAVITATIONAL WAVE RESEARCH IN UKRAINE**

*The paper deals with the history of gravitational wave research in Ukraine and describes two little-known facts and events. Our first comment is concerned with a short period of Dr. Nathan Rosen's life in Kyiv and his scientific activity at the Institute of Physics of the Academy of Sciences of the UkrSSR in 1936—1938 years. At that time, he has published several papers, which promoted the first steps in the creation of modern theories in the fields of gravity and quantum physics. These papers, including "Plane-polarized waves in the General Theory of Relativity", have been issued in the "Ukrainian Physical Notes" ("Ukrainski Fizychni Zapysky"), which was not widely accessed. We quote also some letters from correspondence of N. Rosen and A. Einstein in period. The second comment refers to the history of gravitational wave experimental research in Kyiv, which were initiated in 1970s by Prof. Aleksey Z. Petrov at the Institute of Theoretical Physics of the Academy of Sciences of the UkrSSR. We describe briefly the development of the detector of high-frequency gravitational waves (the Weber type antenna) as well as results obtained by K. A. Piragas's group.*

**Keywords:** gravitational waves; detectors of gravitational waves; history of physics: Nathan Rosen.

---

### **INTRODUCTION**

In the paper "High-Frequency Gravitational Wave research and application to exoplanet studies" by Robert M. L. Baker, Jr. ([2], see this issue, pp. 47—63) the history of gravitational wave (GW) research was discussed. The author has also mentioned the GW research in Ukraine. We would like to shed more light on some little-known facts of these studies in Ukraine and give two comments.

The first comment is concerned with a short period of Dr. Nathan Rosen's life in Kyiv and his scientific activity at the Institute of Physics of the Academy of Sciences of the UkrSSR<sup>1</sup> in 1936—1938 years. At that

time, he has published several papers which promoted the first steps in the creation of modern theories in the fields of gravity and quantum physics. These papers have been issued in the little-known journal "Ukrainian Physical Notes" ("Ukrainski Fizychni Zapysky"), which was not widely accessed. Therefore, we briefly describe some Rosen's results as well as highlight excerpts from the letters between Nathan Rosen and Albert Einstein, which have been saved at "The Albert Einstein Archives" in Israel. This correspondence was first brought to the notice of a wide scientific commu-

---

© Ya. S. YATSKIV, I. B. VAVILOVA,  
O. A. ROMANETS, V. S. SAVCHUK, 2017

<sup>1</sup> UkrSSR — Ukrainian Soviet Socialist Republic, one of the constituent republics of the former Soviet Union from its inception in 1922 to its breakup in 1991.

nity by Olena A. Shcherbak and Varpholomei S. Savchuk [23, 24].

The second comment is related to the history of GW experimental research in Kyiv, which were initiated in 1970s by Prof. Aleksey Z. Petrov at the Institute of Theoretical Physics of the Academy of Sciences of the UkrSSR. The development of the Weber type antenna for this purpose was described briefly in the book “General Relativity Theory: Tests through Time” by Yatskiv Ya.S., Alexandrov A.N., Vavilova I.B., Zhdanov V.I., Kudrya Yu.N., Parnovsky S.L., Fedorova O.V., Khmil S.V., namely, in the Chapter “World lines in the relativistic space-time of Ukraine” [34]. The history and present-day state of GW research are discussed in the books by Alexandrov A.N., Vavilova I.B., Zhdanov V.I., Zhuk A.I., Kudrya, Yu.N., Parnovsky S.L., Fedorova E.V., Yatskiv Ya.S. “General Relativity Theory: Recognition through Time” ([1], in Russian) and “General Relativity: Horizons for Tests” ([35], in Ukrainian). They contain a theoretical basis of the General Relativity, its experimental tests and applications. The monographs address scientists, post-graduated students, and students specialized in the natural sciences as well as everyone who takes interest in the General Relativity.

#### LIFE AND SCIENTIFIC ACTIVITY OF NATHAN ROSEN IN KYIV (1936–1938 years)

Nathan Rosen (March 22, 1909, New York, USA – December 18, 1995, Haifa, Israel) was an American-Israeli foremost theoretical physicist. He received a bachelor's degree in electromechanical engineering (1929), a master's degree in physics (1931), and Ph.D. in physics (1932) from the Massachusetts Institute of Technology. During his student time, Nathan Rosen has published several papers, among them “The Neutron,” in which he provided the first reliable calculation of the structure of the atomic nucleus a year before their discovery by James Chadwick. Besides of hydrogen molecule, he developed a lifelong interest also in wave functions and their application to the gravitation physics.

The first acquaintance with Albert Einstein took place when N. Rosen wrote a master's thesis. He came to Princeton to be engaged in molecular physics and was interested on A. Einstein's opinion re-



Nathan ROSEN, an American-Israeli foremost theoretical physicist

garding his dissertation. After the meeting of these scientists, a fruitful cooperation has begun between them. As a result, in 1934, after a short research fellowship at the University of Michigan, Nathan Rosen became Albert Einstein's assistant at the Institute for Advanced Study in Princeton and continued in that position until 1936 (see, [12], and “Nathan Rosen” in Wikipedia). Just in these years, two famous papers have been published, namely “The Particle Problem in the General Theory of Relativity” [9] and “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?” [8].

The first paper [9] was written together with Albert Einstein. Using Einstein's field equations, the authors found the mathematical solution of nontrivial problem by merging the models of a black hole and a white hole (a black hole moving backward in time). Later this theoretical solution was named as the Einstein–Rosen bridge or space-time wormhole, which connects distant areas in hypothetic universe. In 1962, John A. Wheeler and Robert W. Fuller showed that this type of wormholes is unstable. It is believed that the Einstein–Rosen bridge is a theory of Nathan Rosen.

The second paper [8] was written jointly with Albert Einstein and Boris Podolsky, a fellow student to Einstein. Namely Rosen pointed out the peculiarities

of Einstein's research involving the entangled wave functions. The effects described in the paper were labeled later as the "Einstein-Podolsky-Rosen paradox" that raises hackles with physicists until now<sup>2</sup>. *"It advanced a "thought experiment" to show the wrong-headedness of the quantum theory, which many scientists of the time found highly unpalatable. Einstein deemed it something akin to magic. The paper pointed out conceptual problems that the authors had with the theory and what they saw as its paradoxical and contradictory aspects... The paper drew a sharp response from Niels Bohr, and quantum theory has since been widely accepted. Scientists use it as a primary tool to predict the interactions of atoms, molecules, elementary particles and radiation; it plays a role in virtually all the chemical and physical reactions that control our lives and the world around us"* [22].

Despite of these remarkable results during the research fellowship at the Institute for Advanced Study, Nathan Rosen could not find a job at a time of the Great Depression, and Einstein gave advice to him to continue a scientific career abroad. So, in 1936, at the personal request of A. Einstein in his correspondence with Vyacheslav Molotov [16], the Chairman of the Council of People's Commissars of the USSR in 1930–1941, Nathan Rosen came to the Soviet Union.

During the two-year stay in Kyiv from 1936 to 1938, Nathan Rosen was a head of the department of theoretical physics of the Institute of Physics of the Academy of Sciences of the UkrSSR as well as he has lectured at the department of theoretical physics of the Kyiv University [34, 23]. At that time, he has published three papers on gravity theory and quan-

tum physics in the "Ukrainian Physical Notes" (in Ukrainian language), which are not well known even now, and had a correspondence with A. Einstein.

This correspondence between Rosen and Einstein had both scientific and private sense and could be a source of additional information on Rosen's life in Kyiv.

In the first letter to A. Einstein (February 26, 1937), after discussion of the problems of theoretical physics, Nathan Rosen writes that *"I am working at the Physical Institute of the Ukrainian Academy of Sciences, doing research, and I also lecture at the University of Kiev. I am always very busy – there is so much to be done! But, although I haven't the leisure that I had in Princeton, I have other, more important, thing. I have the feeling that I am useful and needed (and without such a feeling life is not worth very much). And – at any rate, up to the present – in order to get my bread. I have not had to win the favor of little men in high positions. So, all in all, I am still grateful to you for your help in arranging for me to come here"* [27].

We see from this letter that N. Rosen was overfilled with desire to work in Ukraine as long as possible. He came to Kyiv with his wife, and their son was born here. He wrote with enthusiasm about the Soviet system and even discussed an opportunity to find work at the University of Dnipropetrovsk for one of Princeton's chemists. But he could not find a responsible soviet person who would be entrusted with this scientist: *"the authorities are cautious because of their experiences with foreign spies and wreckers"* [28].

A year later, we read (March 24, 1938): *"As you see, we are still in Kiev. And we still feel very enthusiastic about the Soviet Union... Perhaps I shall have occasion to speak with you in person next summer"* [29]. But his plans have been changed gradually: first of all, his family moved to America. His last letter from Ukraine (July 31, 1938) was already very different from the first letters: *"When I last wrote to you, I was expecting to come to America this summer for a visit. Since then my plans have changed. In a few weeks, I am coming back to U.S. to remain there. This I am doing in spite of the fact that I am very pleased with what I have seen of the Soviet Union and very much enjoy living in it. The reason for this step is mainly that I am dissatisfied with my own work and my ability. I feel that I am not accomplishing as much as I ought to. My conscience does not permit me to remain here. Hence, I am returning to*

<sup>2</sup> The tests of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox conducted at the end of the XX century have led to the concept of the "quantum teleportation" (see, for example, [3, 5, 11, 25]), i.e. obtaining the information on the state of one of the particles that are in the "quantum confinement", when determining the state of the second particle. It is worthily to mention that the first successful teleportation of the quantum state of particles onto the Earth orbit was realized by using the Chinese satellite "Micius" (QUESS) in 2017 [16]. For the first time a link of the transcontinental connection, the encryption key for which was distributed using methods of quantum cryptography, took place on September 29, 2017 ([https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_Experiments\\_at\\_Space\\_Scale](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_Experiments_at_Space_Scale)).

*the States and shall look for some kind of job not requiring research work. If I find it then I shall work on research in my spare time without feeling any responsibility» [30]. «An impression arises that N. Rosen knew about the perusal of his correspondence and tried to make A. Einstein know the true reasons of his departure from the USSR. One may suppose that A. Einstein, who knew N. Rosen well, could guess why “conscience” did not allow him to stay more in the USSR» [24]. The reason was resulted from “a purge of the Soviet scientists”. Many of them had already been condemned or shot dead. Even Alexander G. Goldman, Director of the Institute of Physics where Rosen has worked, was arrested by the organs of the NKVD<sup>3</sup> of the UkrSSR on January 22, 1938. So, considering these circumstances, a decision of Nathan Rosen to go out from the USSR has helped him to escape the inevitable repressions.*

In 1936—1939, Nathan Rosen published several papers, three of them were issued, as we already noted, in the “Ukrainian Physical Notes” [17—19].

The paper [17] was devoted to the consideration of plane-polarized waves in the General Relativity Theory. At the end of this paper there was a note that this work is a continuation of research “On the gravitational waves”, the results of which have been published in the “Journal of the Franklin Institution” in 1937 [10]. Rosen has written to Einstein (May 6, 1937): *«About the work I sent you – I thought over carefully your remarks in connection with it and I read the improved version in the Journal of Franklin Institute but I am not yet satisfied. Our original problem was the question of plane waves (where plane is in the sense of a Euclidean space into which the space considered goes over in the absence of the waves). True there was an error in our reasoning. In the published paper, the error is avoided – but at the cost of avoiding the problem. The question is raised: are there plane waves? And the answer is given: yes, there are cylindrical waves. For this reason it seems to me that the original problem needs further investigation. It seems to me that from the point of view of the original problem what I wrote in the paper I sent you is not incorrect but is perhaps incomplete. I think one can show that for all plane waves of*

*the type under discussion there are no solutions which are free from singularities everywhere and for all time» [28]. So, Rosen has outlined that the nonlinearities of such a kind, whatever small they were, in the equations of gravitational perturbation would inevitably lead to the change of the tensor sign, which, in its turn, would make the solution proposed out of sense: “*the limit, mentioned above, of plane waves with finite amplitudes does not obviously exist in the general theory of relativity*” [17].*

In 1957, I. Robinson and G. Bondi obtained such generalizations of a weak plane-polarized wave using the same approach, and also pointed out to this singularity, but they noticed that it can be eliminated by coordinate transformation (see, for example, [4]). It's generally accepted that they first obtained this result. As a fact, this result was obtained by N. Rosen yet in 1937, and only that this paper was published in the journal, which was not practically accessible to foreign physicists, and, moreover, in Ukrainian language without translation, it was virtually unknown to the world scientific community. Nevertheless, a conclusion can be drawn that N. Rosen's work [17]<sup>4</sup> was among the first which concerned the creation of the model of gravitational waves. We can add that Nathan Rosen has returned later, in 1950-ies, to the problem of gravitational waves and their properties. For example, in 1993 he and K.S. Virbhadrappa published the paper “Energy and momentum of cylindrical gravitational waves”, where they write in abstract: *“It was found many years ago [20] that in cylindrical polar coordinates the energy and momentum densities of gravitational waves, calculated with the help of a pseudo-tensor, vanish. However, using Cartesian coordinates, one finds them to be finite and reasonable” [21].*

In 1938 yet one paper was issued by Rosen written together with the Ukrainian physicist G. Ilkevich. It was devoted to the quantum physics, namely, corrections to the Thomas-Fermi model to obtain a coincidence of theoretical results with experiments for light elements [19]. Another paper "Elementary particles in the field theory" [18] was concerned with problem of the existence of an electron in classical field theo-

<sup>3</sup> The People's Commissariat for Internal Affairs (abbreviated NKVD, Narodnyi Komissariat Vnutrennikh Del)

<sup>4</sup> The detailed analysis of the N. Rosen's work [17] is made by Shcherbak O.A. and Savchuk V.S. [24].

ry. It was shown that the classical theory of a field without expansion does not imply the existence of elementary particles. Rosen has proposed to introduce new "functions of matter", similar to the wave functions of quantum theory. The solution of an equation based on the use of "functions of matter" allows the existence of solution for electron, but it means that the mass of the electron must be negative. To avoid this problem, Rosen suggested that this difficulty can be eliminated by quantization. This paper was issued already in 1939, when Nathan Rosen came back from Ukraine to the US.

After return to the United States, Rosen has lectured at the University of North Carolina at Chapel Hill from 1941 to 1952. *"In 1953, after permanently moving to Israel, he joined the Technion in Haifa, Israel. During this time Rosen was advisor to Asher Peres. He was President of the Ben-Gurion University of the Negev in the 1970s and commuted between the two institutions from his home in Haifa. Additionally, Nathan Rosen helped found the Israel Academy of Sciences and Humanities, the Physical Society of Israel (serving as president from 1955–1957), and the International Society on General Relativity and Gravitation (president 1974–1977). He was very active in encouraging the founding of higher educational institutions in Israel"* [22].

#### A BRIEF HISTORY OF DEVELOPMENT OF THE WEBER TYPE GRAVITATIONAL WAVE DETECTOR IN KYIV, IN 1970s

At the end of 1970s Aleksey Zinovievich Petrov, member of the Academy of Sciences of the UkrSSR, Chairman of the Gravity Society of the Sci.-Tech. Council of the Ministry for Higher Education of the USSR in 1962–1972, who worked at the Institute for Theoretical Physics of the Academy of Sciences of the UkrSSR (hereafter – ITP), has initiated the experimental GW research. He proposed a work on the creation of a unique device – the Weber type antenna – for monitoring of gravitational waves from powerful extragalactic sources. Being an outstanding physicist-theorist, the author of the classification of gravitational field by three types ("Petrov types") [13, 14], he was aware of the need for an experimental confirmation of the main principles of the Gen-

eral Relativity. Consequently, the development of the Kyiv detector (Weber bar) and the observation of gravitational waves were conducted with the support and in close contact with the well-known scientist Vladimir B. Braginsky, who has previously begun to construct a similar detector in Moscow. The ITP Scientific Council approved a decision to create a special experimental laboratory and gave a start to the production of unique equipment, including vacuum chamber, which was made at the E.O. Paton Electric Welding Institute in Kyiv. General management of works in this laboratory was carried out by, Kazimir A. Piragas [36], while a principal development of "Weber bar" was guided by A.M. Sviridov.

*"As far as till now there are scientists who do not understand why it was necessary to carry out a deliberate "zero" experiment in Kyiv, we give some explanation. We recall that the history of gravitational wave observations began with the "supposed disco-very" of gravitational signals by Weber, whose autho-ritiy was and is very high. But observed signal magnitude was very large that was in contradiction with the General Relativity Theory. Therefore, it was important to either refute or strongly confirm the Weber's results. In a positive case, it would be a matter of discovery, which may require a substantial revision of many theoretical paradigms. By this reason, experiments on the discovery of gravitational waves have roused and still are of great interest among the gravitationalists around the world"* ([34], pp. 227–229).

A premature death of A.Z. Petrov made significant changes of the plans for theoretical and experimental gravitational studies in Ukraine. Some of his followers, including employees of the experimental laboratory, have passed to the Ukrainian Center for Standardization and Metrology of the State Committee of Statistics of the USSR. For example, in 1972, K. Piragas said at the meeting of the Gravity Society in Moscow devoted to the memory of A.Z. Petrov: *"Aleksei Zinovievich assigned great expectations to his work on the modeling of gravitational fields. Recently, he showed a great interest in experiments in the field of gravity. He wanted to derive a solution to the problem – the information of the language of general relativity to the language of the experimental physicist. Alexei Zinovievich did not manage to complete this cycle of work. Part of this work will be completed by his students."*

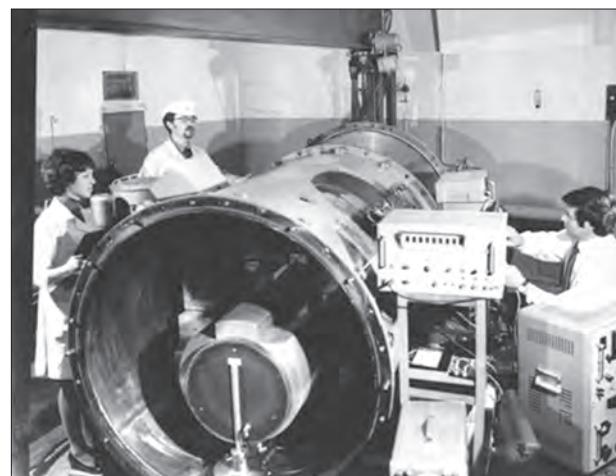
*He also placed great hopes on solving the problem of energy and quantizing gravity. He tried to help the experimental groups in our country. Now in Kyiv there is an experimental group that is working on testing the Weber experiment together with Vladimir Borisovich Braginsky. Aleksei Zinovievich himself was going to give a theoretical justification for Weber's experiments. He believed to work on the processing of his results. It's all left unfinished. In addition, Alexei Zinovievich had unpublished work on the influence of the structure of the Sun on gravitational effects and on observations in the General Relativity Theory. His employees in Kyiv were engaged in group theory, the Cauchy problem and groups of motion of certain spaces..." ([31], pp. 42–45).*

It is worth noting that at the very beginning of attempts to detect gravitational waves, prof. A.S. Davydov, the ITP Director in 1973–1988, expressed his reasonable doubts about the possibility of success in this project with the planned equipment. Nevertheless, this group – K.A. Piragas, A.M. Sviridov, V.A. Kopylov, S.S. Zhovnir, I.T. Zhuk, L.N. Blagoveschenskaya, later on Yu.A. Opanasyuk and A.N. Alexandrov – had spent a lot of time in attempts to detect gravitational waves using the constructed Weber bar (Fig. 1, 2), which was installed at a basement of the "Feofaniya" hotel in Kyiv (see, for example, a paper "Hunting for heavy rays" in the advertising journal "Science and Society", 1980, No. 1).

A key task of the Kyiv group was to set up and verify the presence of gravitational signals at least at the same level as J. Weber [32, 33]. They have analyzed main types of GW antennas and results of previous GW experiments as well as developed own technique for registration of the high-frequency component of gravity field and constructed the gravitational detector of Weber type.

We will quote hereafter certain fragments from the final report [15] of K.A. Piragas's group, since they are little known to the scientific community.

*"The main part of this detector, gravitational antenna, had the parameters as follows: an aluminum cylinder with a mass of 1100 kg, a length of 150 cm, the resonance frequency of the fundamental vibration mode is 1617 Hz, the quality factor is  $2.5 \times 10^5$ ; the antenna is equipped with a capacitive sensor of small displacements. The sensitivity of the detector is limited, basically, by the Brownian oscillations of the cylinder of the*



**Fig. 1.** The Weber type detector of gravitational waves developed at the Institute of Theoretical Physics of the AS UkrSSR and later at the Ukrainian Center for Standardization and Metrology of the State Committee of Statistics of the USSR. Kyiv, 1970s (photo from [15])



**Fig. 2.** From left to right: M.N. Polozov, V.A. Kopylov, A.M. Sviridov, Yu. S. Vladimirov, and K. A. Piragas. The author of the picture "Diogenes climbed out of his barrel trying to hear the gravitational signals" on the detector's casing is I.T. Zhuk (photo from [31])

gravitational antenna, the mean square of the amplitude of these oscillations ( $\sigma_{bp}$ ) at a temperature of  $\approx 300^\circ K$  is  $5.9 \times 10^{-14} \text{ cm}$ . The detector has operated at this temperature of 18.5 days during a session". After recording the oscillation's amplitudes of the cylinder and their statistical processing, they obtained that the detector's output signal was well approximated by the Rayleigh distribution, i.e. due to the thermal noise of

the cylinder. On Nov 5, 1976 they “detected a single burst of non-thermal origin with an amplitude of  $13 \pm 16 \sigma_{br}$  and a duration of  $t \leq 2s$  ...” ([15], p.3) Their results were of importance for fundamental physics (gravitational radiation), metrology (measurements of ultra-small displacements), statistical radio physics (thermal fluctuations in narrow-band systems)”. The K.A. Piragas’s group when summing up has also written that “*the most powerful source of gravitational radiation near Earth should have a space origin and be expected at 100 Hz–100 KHz, i.e. from supernova burst or collapse of stars with a weak optical detectability. Such bursts could take place one time per year in our Galaxy and able to trigger multiple broadband outbursts at 1–100 KHz, duration from  $10^{-3}$ s to 1s,  $F = 10^{10}$  erg/cm $^2$ s and amplitude  $h = 2 \times 10^{-19} – 10^{-17}$  as well as such outbursts, for example, in the Virgo cluster, one time per month with  $F = 10 – 10^4$  erg/cm $^2$ s and amplitude  $h = 2 \times 10^{-22} – 10^{-20}$ . The sensitivity of the Weber detector was  $2 \times 10^4$  erg/cm $^2$ s*” ([15], p. 24). It allowed them to conclude that “*one signal per month could be detected near limit sensitivity of detector as well as less frequent strong signals, two orders of magnitude greater than the limit sensitivity*”.

So, the GW detectors that should have started work simultaneously with Kyiv’s detectors – in St. Petersburg and in Moscow – have not worked yet. By this reason the result obtained with Kyiv’s detector could not be confirmed as well as be compared with results by Weber (due to political situation of the end of 1970-ties). In 1980, before the Moscow Olympiad, the experiment in Kyiv was cancelled, and the experimental laboratory was disbanded. As for the V.B. Braginsky’s idea “*to organize a broad program of GW research in the Soviet Union, it was eventually encountered lacks of funds and of the necessary technological base*” ([34], pp. 227-228).

We can conclude that a task to construct the Weber type antenna for detecting high-frequency gravitational waves was completed by K.A. Piragas’s group [15]. The result of the measurements was rather negative, as in many other groups. Nevertheless, the first attempts to detect gravitational waves around the world gave a powerful impetus to technological research in order to create the next generation of GW detectors, e.g. the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO).

## INSTEAD OF CONCLUSION

On October, 3, 2017, the Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2017 with one half to Rainer Weiss (LIGO/VIRGO Collaboration) and the other half jointly to Barry C. Barish (LIGO/VIRGO Collaboration and Kip S. Thorne (LIGO/VIRGO Collaboration) “for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves”. In view of the special importance of this discovery, we will quote below the press release of the Nobel Committee on this occasion, which is titled as the “Gravitational waves finally captured”:

“On 14 September 2015, the universe’s gravitational waves were observed for the very first time. The waves, which were predicted by Albert Einstein a hundred years ago, came from a collision between two black holes. It took 1.3 billion years for the waves to arrive at the LIGO detector in the USA.

The signal was extremely weak when it reached Earth, but is already promising a revolution in astrophysics. Gravitational waves are an entirely new way of observing the most violent events in space and testing the limits of our knowledge.

LIGO, the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, is a collaborative project with over one thousand researchers from more than twenty countries. Together, they have realized a vision that is almost fifty years old. The 2017 Nobel Laureates have, with their enthusiasm and determination, each been invaluable to the success of LIGO. Pioneers Rainer Weiss and Kip S. Thorne, together with Barry C. Barish, the scientist and leader who brought the project to completion, ensured that four decades of effort led to gravitational waves finally being observed.

In the mid-1970s, Rainer Weiss had already analyzed possible sources of background noise that would disturb measurements, and had also designed a detector, a laser-based interferometer, which would overcome this noise. Early on, both Kip Thorne and Rainer Weiss were firmly convinced that gravitational waves could be detected and bring about a revolution in our knowledge of the universe.

Gravitational waves spread at the speed of light, filling the universe, as Albert Einstein described in his general theory of relativity. They are always created when a mass accelerates, like when an ice-skater

pirouettes or a pair of black holes rotate around each other. Einstein was convinced it would never be possible to measure them. The LIGO project's achievement was using a pair of gigantic laser interferometers to measure a change thousands of times smaller than an atomic nucleus, as the gravitational wave passed the Earth.

So far all sorts of electromagnetic radiation and particles, such as cosmic rays or neutrinos, have been used to explore the universe. However, gravitational waves are direct testimony to disruptions in space-time itself. This is something completely new and different, opening up unseen worlds. A wealth of discoveries awaits those who succeed in capturing the waves and interpreting their message" ([https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2017/press.html](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/press.html)).

**Acknowledgements.** Romanets O.A. and Savchuk V.S. express their sincere thanks to the "Albert Einstein Archives" of the Jewish National and University Library (Jerusalem), and personally to Barbara Wolff, for the kindly provided materials. The authors thank Milentij Golovnya for his help in acquaintance with the archive of the State Enterprise "Ukrmetrteststandart".

## REFERENCES

1. Alexandrov A.N., Vavilova I.B., Zhdanov V.I., Zhuk A.I., Kudrya, Yu.N., Parnovsky S.L., Fedorova E.V., Yatskiv Ya.S. General Relativity Theory: Recognition through Time. 332 p. (Naukova dumka, Kiev, 2015). ISBN 978-966-00-1497-8 [In Russian].
2. Baker Robert M.L., Jr. High-Frequency Gravitational Wave research and application to exoplanet studies. *Space Science and Technology*, **23**(3), 47–63 (2017).
3. Bennett C. H., Brassard G., Crépeau C., Jozsa R., Peres A., Wootters W.K. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. *Phys. Rev. Lett.*, **70**, 1895–1899 (1993).
4. Bondi H. Plane gravitational waves in General relativity. *Nature*, **179**, 1072–1073 (1957).
5. Bouwmeester D., Pan J.W., Mattle K., Eibl M., Weinfurter H., Zeilinger A. Experimental quantum teleportation. *Nature*, **390**, 575–579 (1997).
6. Braginsky V.B., Rudenko V.N. Relativistic gravitational experiments. *Usp. Fiz. Nauk*, **100**, 395–424 (1970).
7. Braginsky V.B., Manukin A.B., Popov E.I., Rudenko V.N. The search for gravitational radiation of non-terrestrial origin. *Physics Letters*, **45A**(4), 271–292 (1973).
8. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, **47**(10), 777–780 (1935). doi:10.1103/PhysRev.47.777. 1
9. Einstein A., Rosen N. The Particle Problem in the General Theory of Relativity. *Physical Review*, **48**, 73–77 (1935). doi:10.1103/PhysRev.48.73.2
10. Einstein A., Rosen N. On Gravitational waves. *Journal of the Franklin Institute*, **223**, 43–54 (1937). doi:10.1016/S0016-0032(37)90583-0
11. Kwiat P.G., Mattle K., Weinfurter H., Zeilinger A., Sergienko A.V., Shih Y. New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs. *Phys. Rev. Lett.* **75**(24), 4337–4341 (1995). DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.4337
12. Peres A. Nathan Rosen. *Physics World*, 9, 49 (February 1996).
13. Petrov A.Z. Einstein spaces. Translated by R.F. Kelleher. Translation Edited by J. Woodrow. 411 p. (Pergamon Press, 1969). ISBN: 978-148-31-5184-7
14. Petrov A.Z. New methods in the general theory of relativity. (Nauka, Moscow, 1966). 496 p. [In Russian]
15. Piragas K.A., Sviridov A.M. Development of methods and conduction of measurements of high-frequency component of a gravitational field with the help of a quadrupole mass detector. Final Report, Op. 2, No. 61, 92 p. (Ukrainian Center for Standardization and Metrology of the State Committee of Statistics of the USSR, Kyiv, 1976). [In Russian].
16. Ren Ji-Gang, Xu Ping, Yong Hai-Lin et al. Ground-to-satellite quantum teleportation. Available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1707/1707.00934.pdf>
17. Rosen N. Plane-polarized waves in the General Theory of Relativity. Ukr. Fizich. Zapys., 6(1–2), 53–57 (1937) (see, also, reference, *Physik Z. Sowjetunion.*, **12**, 366–372 (1937)). [In Ukrainian]
18. Rosen N. Elementary particles in the field theory. Ukr. Fizich. Zapys. **8**(3), 275–287 (1939). [In Ukrainian]
19. Rosen N., Ilkevich G.P. Corrections to the model of the Thomas-Fermi atom. Ukr. Fizich. Zapys., **7**(1), 55–59 (1938). [In Ukrainian]
20. Rosen N. Energy and momentum of cylindrical gravitational waves. *Phys. Rev.*, **110**, 1, 291–292. (1958). doi:10.1103/PhysRev.110.291
21. Rosen N., Virbhadra K.S. Energy and momentum of cylindrical gravitational waves. *General Relativity and Gravitation*, **25**(4), 429–433 (1993). DOI:10.1007/BF00757123
22. Saxon W. Nathan Rosen, 86, of Israel; Physicist Worked With Einstein, *The New York Times*, 23 Dec. 1995, sec. 1: 28.
23. Scherbak O.A. Nathan Rosen in Ukraine: Unknown pages of life and activity. *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: History of science and technology*, **42**, 179–184 (2012). [In Ukrainian]
24. Shcherbak O.A., Savchuk V.S. Gravitation problems in a little-known N. Rosen's paper of his Kyiv period (1936–1938): To the origins of formation of the gravitational wave theory. *Ukr. J. Phys.*, **52**(10), 1014–1017 (2007).

25. Sherson J.F., Krauter H., Olsson R.K., Julsgaard B., Hammerer K., Cirac J., Polzik E.S. Quantum teleportation between light and matter. *Nature*, **443**(7111), 557–560 (2006).
26. The Albert Einstein Archives, letters to Molotov AEA 20-212.
27. The Albert Einstein Archives, letters to Einstein ALS 20-218.
28. The Albert Einstein Archives, letters to Einstein ALS 20-220.
29. The Albert Einstein Archives, letters to Einstein ALS 20-223.
30. The Albert Einstein Archives, letters to Einstein ALS 20-227.
31. Vladimirov Yu.S. Between physics and metaphysics. Book 3: Geometric paradigm: testing time. 288 p. (LIBROKOM, Moscow, 2011). (Ser.: Science in the USSR: Science in the USSR. Per aspera ad astra.) [In Russian]
32. Weber J. General Relativity and Gravitational Waves. (Interscience, New York, 1961).
33. Weber J. Evidence for discovery of gravitational radiation. *Phys. Rev. Lett.*, **22**, 1320–1324 (1969).
34. Yatskiv Ya. S., Alexandrov A. N., Vavilova I. B., Zhdanov V. I., Kudrya Yu. N., Parnovsky S. L., Fedorova O. V., Khmil S. V. General Relativity Theory: tests through time. 288 p. (Akademperiodyka, Kyiv, 2005). ISBN 966-02-3728-6 [In Ukrainian]
35. Yatskiv Ya. S., Alexandrov A. N., Vavilova I. B., Zhdanov V. I., Zhuk A.I., Kudrya Yu. N., Parnovsky S. L., Fedorova O. V., Khmil S. V. General Relativity: horizons for tests. 264 p. (MAO NAS of Ukraine, Kyiv, 2013). ISBN 978-966-02-6940-8 [In Ukrainian]
36. Piragas K. A. Experimental basis of the General Relativity Theory. Review. ITP AS UkrSSR, Kyiv (1971)

Received 09.10.17

Я. С. Яцків<sup>1</sup>, І. Б. Вавилова<sup>1</sup>,  
О. А. Романець<sup>2</sup>, В. С. Савчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Головна астрономічна обсерваторія  
НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Дніпропетровський національний університет  
імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

#### МАЛОВІДОМІ ФАКТИ І ПОДІЇ З ІСТОРІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ В УКРАЇНІ

Описуються два маловідомих факти і події з історії досліджень гравітаційних хвиль в Україні. Перший з них стосується періоду життя Натана Розена в Києві та його наукової діяльності в Інституті фізики Академії наук УРСР у 1936–1938 роках. У той час він опублікував кілька праць, які сприяли створенню сучасних теорій в області гравітації і квантової фізики. Ці роботи, зокрема «Плоскополяризовані хвилі в загальний теорії відносності», були видані

в журналі «Українські фізичні записки», до якого не було тоді широкого доступу. Ми цитуємо також деякі листи із переписки Н. Розена і А. Ейнштейна в цей період. Другий коментар пов'язаний з історією експериментальних досліджень гравітаційних хвиль, які були ініційовані в 1970-х роках у Києві академіком АН УРСР О.З. Петровим в Інституті теоретичної фізики АН УРСР. Ми коротко описуємо історію створення детектора високочастотних гравітаційних хвиль (антени веберівського типу), а також результати, отримані групою дослідників під керівництвом К.А. Пірагаса.

**Ключові слова:** гравітаційні хвилі, детектори гравітаційних хвиль; історія науки: Натан Розен.

Я. С. Яцків<sup>1</sup>, І. Б. Вавилова<sup>1</sup>,  
Е. А. Романець<sup>2</sup>, В. С. Савчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Главная астрономическая обсерватория  
НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup> Днепропетровский национальный университет имени  
Олеся Гончара, Днепро, Украина

#### МАЛОИЗВЕСТНЫЕ ФАКТЫ И СОБЫТИЯ ИЗ ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В УКРАИНЕ

Рассматриваются два малоизвестных факта и события из истории исследований гравитационных волн в Украине. Первый из них касается периода жизни Натана Розена в Киеве и его научной деятельности в Институте физики Академии наук УССР в 1936–1938 годах. В то время он опубликовал несколько работ, которые способствовали созданию современных теорий в области гравитации и квантовой физики. Эти работы, в том числе «Плоскополяризованные волны в общей теории относительности», были изданы в журнале «Украинские физические записки», к которому тогда не было широкого доступа. Мы цитируем также некоторые письма из переписки Н. Розена и А. Эйнштейна в этот период. Второй комментарий связан с историей экспериментальных исследований гравитационных волн, которые были инициированы в 1970-х годах в Киеве академиком АН УССР Алексеем З. Петровым в Институте теоретической физики АН УССР. Мы кратко описываем историю создания детектора высокочастотных гравитационных волн (антенны веберовского типа), а также результаты, полученные группой исследователей под руководством К.А. Пирагаса..

**Ключевые слова:** гравитационные волны, детекторы гравитационных волн; история науки: Натан Розен.

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.03.073>

УДК 629.78

**A. A. Василенко**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна

## **КОСМІЧНІ МІСІЇ НАЙБЛИЖЧОГО МАЙБУТНЬОГО: ВНУТРІШНЯ ОБЛАСТЬ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ**

*Наведено огляд найближчих за часом проведення космічних місій для дослідження внутрішньої області Сонячної системи, а саме «Solar Probe Plus», «Solar Orbiter», «BepiColombo», «EXOMars» та «InSight». Їхній запуск заплановано на 2018–2020 рр., і кожна з них буде досліджувати або Сонце, або планету земної групи. Коротко описуються призначення та технічне оснащення космічних апаратів, плани їхнього польоту та наукові цілі.*

**Ключові слова:** космічні апарати, орбіта, сонячний вітер, магнітне поле Меркурія, атмосфера Марса, поверхня Марса.

Дослідження Сонячної системи космічними апаратами, що триває вже понад півстоліття, допомагає відповісти на найбільш важливі наукові проблеми вивчення близького космосу. Це проблеми як астрофізики, так і «земних» наук, адже вони стосуються не тільки фізичних процесів як таких, але й загальної картини того, чому, як і коли сформувались Сонце, планети у завершеному вигляді, виникли умови для появи складних органічних сполук та самого життя.

Завдяки суттєвому технологічному прогресу останнього десятиліття космічні апарати отримали змогу виконувати задачі, які раніше здавались неможливими без втручання людини або з огляду на умови перебування апарату. Яскравим прикладом виходу із зони «комфорту» роботи попередніх апаратів є кілька місій, запланованих на наступні 2–3 роки. Особливо це стосується дослідження Сонця з надзвичайно малою відстані апаратами «Solar Probe Plus» та «Solar Orbiter», а також марсіанської місії EXOMars, який вперше

виконає відносно глибоке буріння верхнього шару поверхні Марса та проаналізує отримані зразки.

Представлений огляд висвітлює найбільш важливіші та перспективні місії до внутрішніх областей Сонячної системи впродовж 2018–2020 років, які вже перебувають на завершальній стадії виготовлення космічного апарату або його тестування як цілого.

### **«SOLAR PROBE PLUS»**

Ця американська космічна місія є не тільки першою у списку в нашому огляді, але й «найгарячішою» через те, що космічний апарат, метою якого є вивчення Сонця, наблизиться до нього на безпрецедентну відстань — до 6.2 млн км, тобто на відстань близько 8.5 радіусів Сонця<sup>1</sup>! Таке «екстремальне» наближення із зануренням у корону Сонця потрібне для вирішення двох значущих питань геліофізики<sup>2</sup>: а) чому корона Сонця має настільки вищу температуру, ніж його поверхня?

<sup>1</sup> [https://solarprobe.gsfc.nasa.gov/spp\\_mission.htm](https://solarprobe.gsfc.nasa.gov/spp_mission.htm)

<sup>2</sup> [https://solarprobe.gsfc.nasa.gov/spp\\_science.htm](https://solarprobe.gsfc.nasa.gov/spp_science.htm)

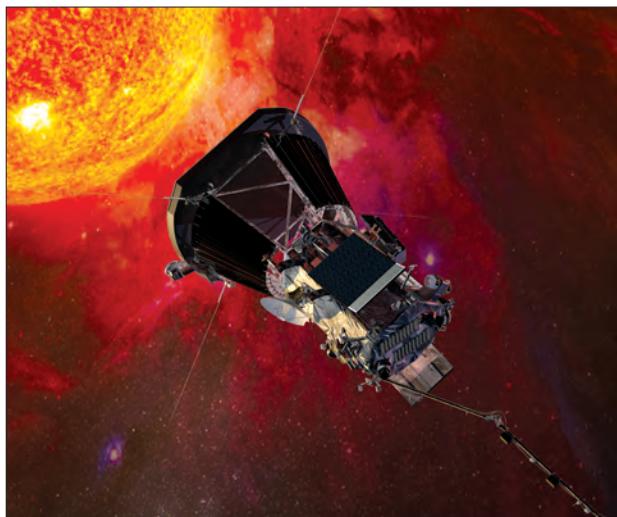


Рис. 1. «Solar Probe Plus» у космосі. Ілюстрація. Credit: Johns Hopkins University

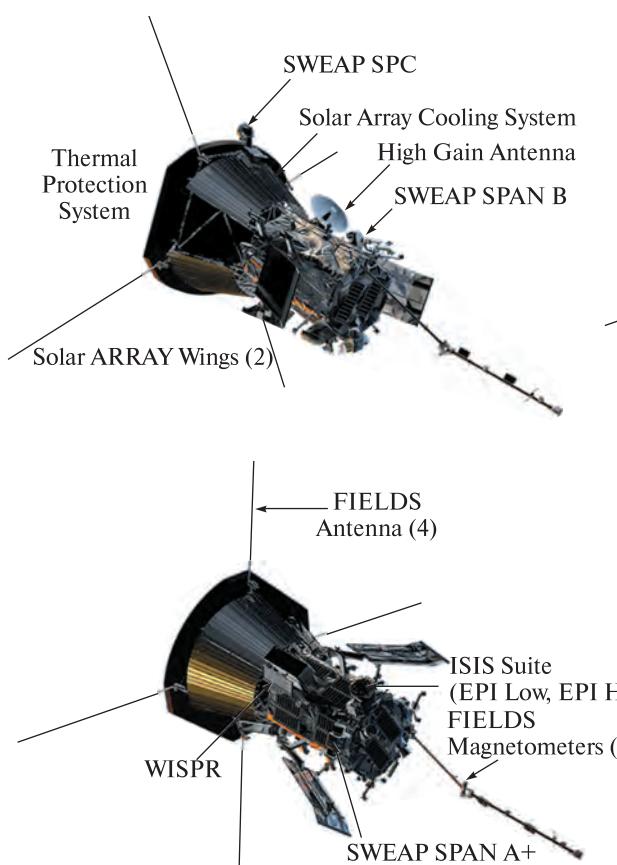


Рис. 2. Розташування інструментів «Solar Probe Plus» з двох позицій. Credit: Johns Hopkins University

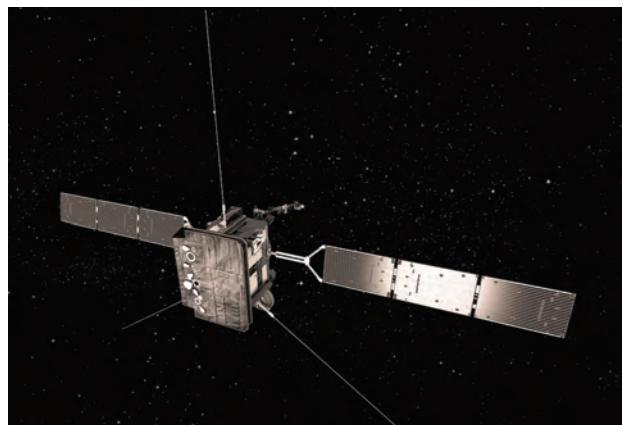


Рис. 3. «Solar orbiter» у космосі. Ілюстрація. Copyright: ESA

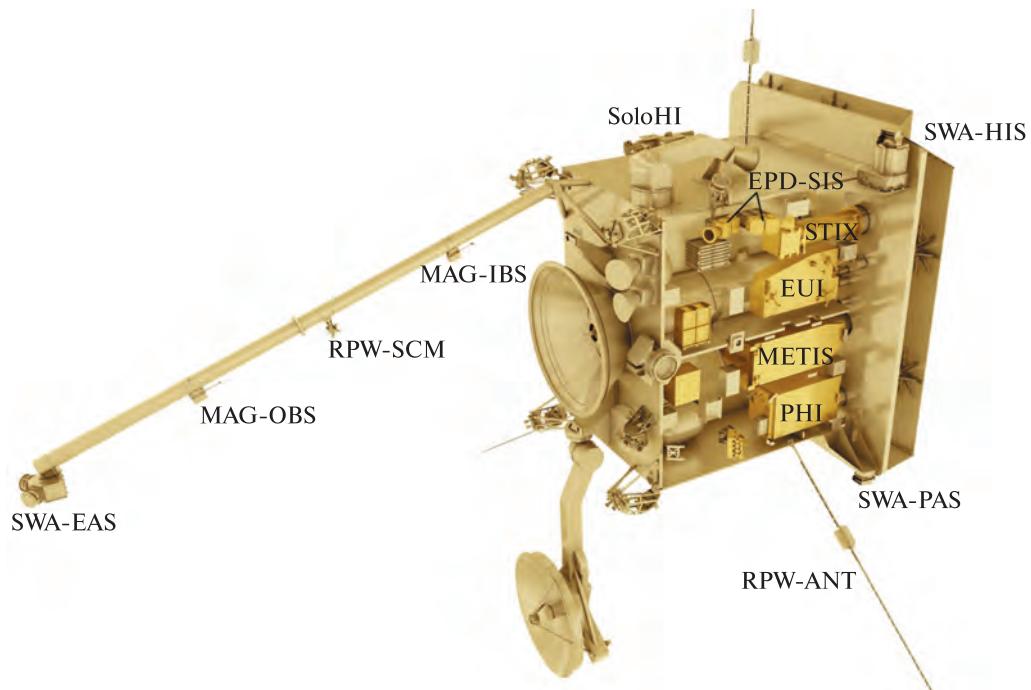
Які фізичні механізми за це відповідають і як саме вони діють? б) як і чому відбувається прискорення частинок сонячного вітру? Яка структура та роль у цьому магнітних полів?

У доповнення до наукової мотивації основних цілей «Solar Probe Plus» нещодавно було виконано важливе дослідження властивостей сонячного вітру. А саме, у середині 2016 р. команді вчених, які працюють з апаратами STEREO, завдяки застосуванню складних алгоритмів для очищення та обробки зображень корони вдалось виявити важливу просторову характеристику сонячного вітру [3]. Вони визначили межу, після якої сонячний вітер з упорядкованої структури променів (які чітко спостерігаються під час сонячних затемнень) переходить у турбулентний стан, — це приблизно 32 млн км від поверхні Сонця. З фізичної точки зору це область, де напруженість магнітного поля падає настільки, що воно не може повністю контролювати поведінку речовини вітру, яка починає вести себе як «звичайний гарячий газ». Оскільки «Solar Probe Plus» кілька разів перетинатиме цю межу, він значно допоможе зрозуміти поведінку магнітних полів та вітру під час «роздаду» його упорядкованої структури.

Старт місії заплановано на літо 2018 р. Під час місії апарат повинен здійснити 24 оберти навколо Сонця та сім гравітаційних маневрів біля Венери.

Екстремальні умови роботи зонду вимагають таких же технологій для його роботи<sup>3</sup>. Так, з боку

<sup>3</sup> <http://parkersolarprobe.jhuapl.edu/index.php#the-mission>



*Рис. 4.* Розташування інструментів «Solar Orbiter». Для ілюстрації бічна стінка видалена. Інструмент SPICE (не показаний) кріпиться до верхньої панелі знизу. Copyright: ESA

Сонця його буде захищено спеціальним товстим (11.43 см) вуглецево-композитним екраном TPS (діаметр 2.43 м), який повинен витримати температури до 1400 °C.

На борту буде розташовано чотири комплекси: а) FIELDS — набір інструментів для прямих вимірювань електричних та магнітних полів, густини плазми, електронної температури, радіовипромінювання та потоку Пойнтінга; б) ISIS — пристрій для вимірювання енергій заряджених частинок від десятків кeВ до 100 MeВ; в) WISPR — телескоп видимого діапазону для отримання зображень корони та внутрішньої геліосфери; г) SWEAP — три пристрої для вимірювання швидкості, густини та температури альфа-частинок, протонів та електронів.

Прогнозується, що зонд функціонуватиме до 2025 року включно.

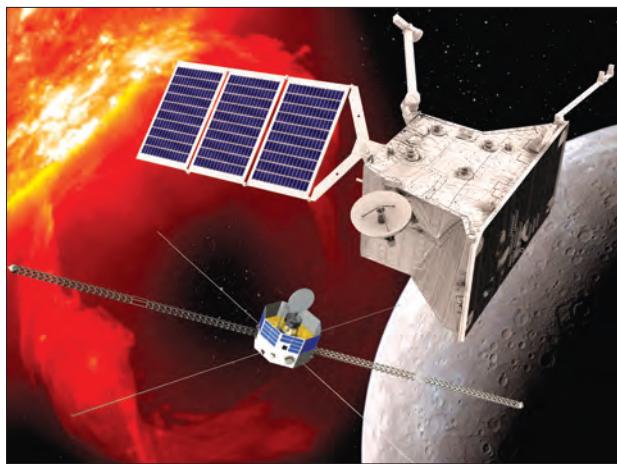
31 травня 2017 р. НАСА прийняло рішення назвати цей космічний апарат іменем Юджина Паркера — астрофізика, який виконав піонерські роботи з дослідження сонячного вітру (саме він запропонував цю назву у 1958 р.) та його взаємодії з магнітним полем.

#### «SOLAR ORBITER»

«Solar Probe Plus» не буде єдиним у своїх дослідженнях Сонця та його околиць. У жовтні 2018 р. паралельно повинна розпочатись місія ЕКА «Solar Orbiter». Це буде складний та великий апарат з більш ніж десятком наукових інструментів<sup>4</sup>. Після запуску він здійснить серію гравітаційних маневрів, які виведуть його на орбіту з максимальним наближенням до Сонця на відстань 42 млн км. Завдяки тому що період цієї еліптичної орбіти буде резонансним до руху Венери, поступово буде збільшуватись її нахил відносно екватора Сонця. Наприкінці основного терміну (біля 7 років) нахил становитиме 25°, а під кінець розширеної місії — 34°. Така особливість руху «Solar Orbiter» дозволить йому спостерігати за полярними областями Сонця.

Як і для «Solar Probe Plus», серед основних цілей європейського апарату значиться дослідження геліосфери (вплив на неї транзієнтів та соняч-

<sup>4</sup> <https://wwwmps.mpg.de/solar-physics/solar-orbiter>



*Рис. 5.* Модулі МРО та ММО на орбіті навколо Меркурія. Ілюстрація. Copyright: ESA

них викидів), магнітосфери та корони Сонця, сонячного динамо, походження сонячного вітру [4, 5]. Принципова відмінність між цими двома апаратами полягає у тому, що «Solar Orbiter» нестиме на собі три телескопи для отримання зображень самого Сонця, а не тільки його корони. По-перше, це буде 16-см телескоп Річі — Кретьєна PHI, метою якого буде побудова векторів магнітного поля та отримання значення швидкості речовини фотосфери на промені зору. У точці перигелію він зможе розрізняти деталі на поверхні Сонця розміром до 150 км. По-друге, це два 3.5-см телескопи EUI<sup>5,6</sup> для УФ-діапазону.

Усі інструменти «Solar Orbiter» можна поділити на два типи — прямої дії та дистанційного вимірювання. Інструменти прямої дії (детектор частинок EPD, магнітометр MAG, реєстратор радіо- та плазмових хвиль RPW, аналізатор SWA) будуть працювати постійно протягоможної 168-денної орбіти. Інструменти дистанційного вимірювання (телескопи PHI<sup>7</sup> та EUI, коронограф METIS<sup>8</sup>, рентгенівський спектрометр STIX, корональний спектрограф SPICE<sup>9</sup> та геліосферна камера SoloHI) працюватимуть лише протягом 30 днів на одному

оберті — у точці перигелію та точках найбільшої кутової відстані від екватора Сонця.

Працюючи у тандемі, «Solar Probe Plus» та «Solar Orbiter» зможуть принести вченим не лише багато нових, але й, можливо, революційних знань, адже ще жодного разу так добре оснащені апарати не запускались настільки близько до Сонця.

### «ВЕРІКОЛОНБО»

Меркурій — найближча до Сонця та найменш вивчена планета земної групи. Пояснюється це головним чином тим, що спостерігати Меркурій із Землі дуже незручно: він ніколи не відходить далеко від Сонця — його максимальна елонгація всього 28°. До того ж це маленька планета — її діаметр лише на 1400 км більший від діаметра Місяця.

Запускати для його вивчення космічні зонди — теж непросте завдання. Причин тут дві — велика інтенсивність теплового потоку від Сонця та гравітаційний вплив останнього, що значно ускладнює виведення апарату на стабільну орбіту навколо Меркурія. До цього часу планету вивчали лише два апарати — «Марінер-10», який у 1974—1975 рр. здійснив три прольоти біля планети [1], і «Мессенджер» — перший апарат, який вийшов на орбіту навколо Меркурія. Ця остання місія<sup>10</sup>, яка була також дуже успішною, тривала з березня 2011 р. до квітня 2015 р.

Наступним етапом вивчення Меркурія стане місія «ВеріColombo»<sup>11</sup>, яка орієнтовно стартуватиме у жовтні 2018 р. запуском ракетою «Аріан-5». Протягом трохи більше семи років польоту до своєї цілі апарат виконає 9 гравітаційних маневрів: один біля Землі, два біля Венери та шість біля Меркурія. На початку 2026 р. очікується старт основної роботи на навколомеркуріанській орбіті<sup>12</sup>.

Космічний апарат «ВеріColombo» складатиметься з трьох окремих модулів, які разом утворюють комплекс «Mercury Composite Spacecraft» (MCS). Перший і найбільший модуль — європейський «Mercury Planetary Orbiter»<sup>13</sup> (MPO), дру-

<sup>5</sup> <https://wwwmps.mpg.de/solar-physics/solar-orbiter-eui>

<sup>6</sup> <http://eui.sdc.be/public/eui-short.php>

<sup>7</sup> <https://wwwmps.mpg.de/solar-physics/solar-orbiter-phi>

<sup>8</sup> <https://wwwmps.mpg.de/solar-physics/solar-orbiter-metis>

<sup>9</sup> <https://wwwmps.mpg.de/solar-physics/solar-orbiter-spice>

<sup>10</sup> <http://sci.esa.int/bepicolombo/56015-missions-to-mercury/>

<sup>11</sup> <http://sci.esa.int/bepicolombo/33022-summary/>

<sup>12</sup> <http://sci.esa.int/bepicolombo/47346-fact-sheet/>

<sup>13</sup> <http://sci.esa.int/bepicolombo/48872-spacecraft/>

гий модуль — європейсько-японський «Mercury Magnetospheric Orbiter»<sup>14</sup> (MMO). Третій модуль — «Mercury Transfer Module» (MTM) — перелітний модуль, який забезпечить доставку МРО та ММО до цілі. Особливістю МТМ буде використання ксенонового електронно-іонного двигуна SEP, який має малу тягу, але може безперервно працювати дуже довго.

Після виходу на орбіту МРО та ММО розділяться: перший працюватиме на полярній орбіті 480 км та 1500 км для перигелю та афелю відповідно, а другий — також на полярній орбіті з параметрами 590 км та 11 640 км. МРО має на борту 11 інструментів, серед яких різні камери (SIMBIO-SYS), 5 спектрометрів — SIMBIO-SYS (ІЧ), PHEBUS (УФ), MIXS (X-ray), MGNS ( $\gamma$ -ray та нейтронів); лазерний альтиметр BELA, радіометр MERTIS тощо. ММО нестиме більш вузькоспеціалізовані прилади для вивчення магнітосфери та сонячного вітру, а саме магнітометр MER-MAG/MGF, камера MSASI для спостереження екзосфери Меркурія у лініях натрію, аналізатор частинок плазми MPPE, аналізатор хвиль у плазмі PWI, пиловий монітор MDM. Основними цілями місії<sup>15</sup> є [2]: а) вивчення Меркурія як планети — його форми, внутрішньої будови, геології, складу та кратерів; б) вивчення структури та динаміки екзосфери та магнітосфери; в) визначення походження магнітного поля Меркурія; г) дослідження полярних областей, які містять водяний лід та водневомісткі сполуки; д) виконання тестів для перевірки ЗТВ.

Ця місія розрахована щонайменше на один земний рік (або 4 меркуріанських роки) з можливістю продовження.

#### «EXOMARS»

Марс... Цю планету людство буде, скоріше за все, вивчати постійно до тих пір, доки воно туди не приде у вигляді малої колонії або поселення. Починаючи від войовничих інопланетян Герберта Веллса і закінчуючи мікроорганізмами або їхніми скам'янілостями, люди постійно хотіли «заселити» цю планету. Але до сьогодні вчені так і не

<sup>14</sup> [http://www.stp.isas.jaxa.jp/mercury/p\\_mmo.html](http://www.stp.isas.jaxa.jp/mercury/p_mmo.html)

<sup>15</sup> <http://sci.esa.int/bepicolombo/31350-objectives/>



Рис. 6. Модулі ММО та МТМ (справа) у складальному цеху.  
Copyright: ESA — Anneke Le Floc'h



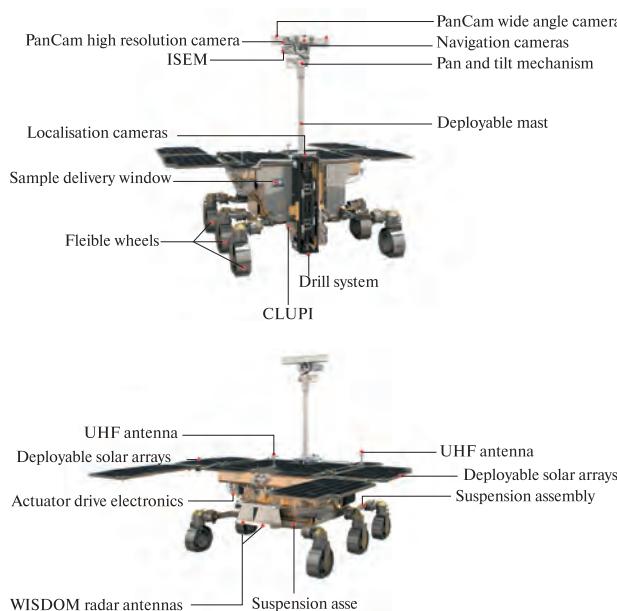
Рис. 7. Підготовка до з'єднання модулів МРО (зверху) та МТМ. Copyright: ESA — Anneke Le Floc'h

відповіли чітко на питання — чи є/було життя на Марсі. Двохетапна місія EXOMars повинна виконати суттєвий крок у його пошуку, адже вперше на марсоході буде використано бур для отримання глибоких проб ґрунту.

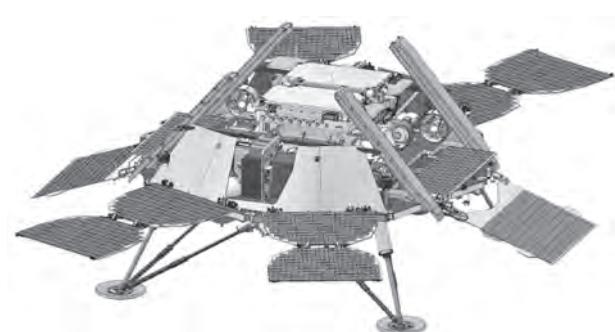
Першим її етапом став запуск 14 березня 2016 р. комплексу TGO-EDM — орбітального апарату



*Рис. 8.* «Exomars Rover» на поверхні Марса. Ілюстрація. Copyright: ESA/ATG medialab



*Рис. 9.* Розташування інструментів лабораторії «Exomars Rover». Copyright: ESA/ATG medialab



*Рис. 10.* Макет посадкової платформи разом з «Exomars Rover». Credit: Roscosmos/Lavochkin/IKI

«Trace Gas Orbite» та експериментального посадочного модуля «Скіапареллі». Перший є спільним європейсько-російським апаратом для вивчення складу атмосфери Марса та його поверхні. Містить у собі чотири інструменти: нейтринний детектор FREND, УФ/ІЧ-спектрометри ACS та NOMAD та стереокамеру CaSSIS. 19 жовтня 2016 р. TGO успішно вийшов на свою орбіту та наразі працює. Модуль «Скіапареллі» зазнав сумної долі, розбившись на поверхні Марса через помилки системи спуску та посадки.

Найважливішою частиною програми EXOMars стане другий етап у 2020 р., коли планується посадити на Марс дві великі лабораторії — мобільну «ExoMars Rover» і стаціонарну платформу з великою кількістю наукових інструментів.

Побудовою марсохода займається ЄКА<sup>16</sup>, і його головною особливістю стане наявність поворотного бура<sup>17</sup>, який зможе брати проби з глибини максимум 2 м. Цікаво, що бур включає у себе мініатюрний ІЧ-спектрометр Ma\_MISS, який буде безпосередньо досліджувати мінералогію в отриманій свердловині. Марсохід також нестиме на собі низку інструментів<sup>18</sup>: мультиспектральні камери (PanCam, CLUPI), спектрометри (ISEM, MicrOmega), радарну систему WISDOM, російський нейтронний детектор «Adron», комплекс для аналізу зразків ґрунту. Останній, окрім дослідження ґрунту самого по собі, буде також шукати біомаркери, ймовірність виявлення яких під поверхнею набагато більша, аніж ззовні через більшу захищеність від опромінювання Сонця та фотокімічних процесів. Для пошуків слідів життя на ExoMars Rover поставлено комплекс пристрій під загальною назвою «Аналітична лабораторія Пастера», куди входить аналізатор молекул MOMA, раманівський спектрометр RLS.

Стаціонарну платформу розробляє російське HBO ім. С. М. Лавочкіна. Це буде автономний комплекс<sup>19</sup> для дослідження складу, властивостей атмосфери та поверхні Марса, його припо-

<sup>16</sup> <http://exploration.esa.int/mars/45084-exomars-rover/>

<sup>17</sup> <http://exploration.esa.int/mars/43611-rover-drill/>

<sup>18</sup> <http://exploration.esa.int/mars/45103-rover-instruments/>

<sup>19</sup> <http://exploration.esa.int/mars/56933-exomars-2020-surface-platform/>

верхневих шарів та сейсміки. Основними науковими завданнями для приладів платформи буде моніторинг поверхні місяця посадки, довготривалий моніторинг клімату та атмосферні дослідження.

#### «INSIGHT»

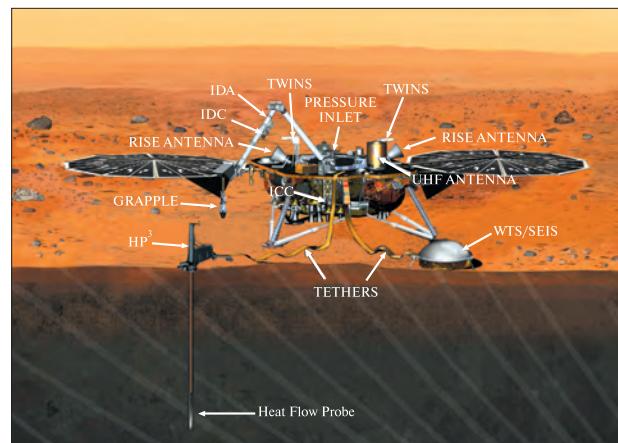
Окрім питання життя, Марс відомий тим, що це єдина планета у Сонячній системі, де у минулому відбувалась вулканічна діяльність, подібна до земної. Але вона не була довгою, про що свідчить відсутність окремих тектонічних плит, а це, у свою чергу, надає унікальну можливість збереження древнього «фото» структури марсіанського ядра, мантії та кори. Таким чином, з точки зору фундаментальних геологічних процесів Марс є такою собі «золотоволоскою»: з одного боку, він є достатньо масивним, щоб у його надрах відбулась диференціація речовини, але не достатньо для того, щоб підтримувати теплові процеси та свої «геологічні» процеси протягом усього часу свого існування.

«InSight» (попередня назва GeMS) — місія НАСА в рамках програми «Discovery», яка буде першою місією, призначеною виключно для дослідження надр Марса<sup>20</sup>. Вона буде вирішувати одну з найбільш фундаментальних проблем<sup>21</sup> — розуміння процесів, які сформували планети земної групи чотири мільярди років тому.

«InSight» буде «проникати» глибоко під поверхню Марса та виявляти «життєво важливі ознаки» планети: її «пульс» (сейсмологія), «температуру» (датник теплового потоку), і «рефлекси» (позиціонування). Найголовнішими в цьому апараті будуть два інструменти. Перший — надзвичайно чутливий французький герметичний сейсмометр SEIS, який після посадки модуля за допомогою маніпулятора буде знято з платформи та поставлено на поверхню Марса. Другий — HP3<sup>22</sup>, який розшифровується як «Комплекс вивчення теплових потоків та фізичних властивостей». По суті це стрічка, на початку якої змонтовано ударний механізм «Trackor mole», який дозволить заглибитися на 5 м під поверхню. На усій довжині стрічки через кожні 10 см змонтовано датники температури. Це дозво-



*Puc. 11. «InSight» у чистій кімнаті цеху Lockheed Martin. Credit: NASA/JPL-Caltech/Lockheed Martin*



*Puc. 12. «InSight» на поверхні Марса та розташування його інструментів. Ілюстрація. Credit: NASA/JPL-Caltech*

лить отримати параметри тепlopровідності та величину потоку тепла від надр планети.

Апарат також нестиме на борту ще ряд інструментів<sup>23</sup>, такі як різні камери та датники стану зовнішнього середовища. Серед них можна виділити незвичний інструмент RISE, який по суті представляє собою дві антени X-радіодіапазону, направлені у протилежні сторони. Його мета — на основі ефекту Допплера позиціонувати «InSight» на поверхні з точністю до сантиметрів для вивчення обертання Марса навколо своєї осі та визначати його коливання.

<sup>20</sup> <https://insight.jpl.nasa.gov/overview.cfm>

<sup>21</sup> <https://insight.jpl.nasa.gov/science.cfm>

<sup>22</sup> <http://www.dlr.de/pf/en/desktopdefault.aspx/tabid-8653>

<sup>23</sup> <https://insight.jpl.nasa.gov/technology.cfm>

Запуск апарату заплановано на травень 2018 р. з прибуттям до Марса в кінці листопада. Прогнозована тривалість роботи на Марсі послідовника місії «Phoenix» розрахована на два земних роки.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Патон Б. Є., Вавілова І. Б., Негода О. О., Яцків Я. С. Важливі віхи комічної ери // Космічна наука і технологія. — 2001. — 7, № 1. — 92 с.
2. Benkhoff J., van Casteren J., Hayakawa H., et al. BepiColombo — Comprehensive exploration of Mercury: Mission overview and science goals // *Planet. Space Sci.* — 2010. — **58**, N 1-2. — P. 2.
3. DeForest C. E., Matthaeus W. H., Viiall N. M., Cranmer S. R. Fading coronal structure and onset of turbulence in the young solar wind // *Astrophys. J.* — 2016. — **828**, N 2. — P. 66—82.
4. Müller D., Marsden R. G., St. Cyr O. C., Gilbert H. R. Solar Orbiter. Exploring the Sun-Heliosphere Connection // *Solar Phys.* — 2013. — **285**, N 1-2. — P. 25.
5. Woch J., Gizon L. The Solar Orbiter mission and its prospects for helioseismology // *Astron. Nachr.* — 2007. — **328**, N 3. — P. 362.

Стаття надійшла до редакції 22.06.17

## REFERENCES

1. Paton B. Ye., Vavilova I. B., Negoda O. O., Yatskiv Ya. S. Important milestones in the history of the space era. *Kosm. nauka tehnol.*, 7(1): 1—92 (2001).
2. Benkhoff J., van Casteren J., Hayakawa H., et al. BepiColombo — Comprehensive exploration of Mercury: Mission overview and science goals. *Planet. Space Sci.*, **58** (N 1-2), 2 (2010).
3. DeForest C. E., Matthaeus W. H., Viiall N. M., Cranmer S. R. Fading coronal structure and onset of turbulence in the young solar wind. *Astrophys. J.*, 828, 66—82 (2016).
4. Müller D., Marsden R. G., St. Cyr O. C., Gilbert H. R. Solar orbiter. Exploring the Sun-Heliosphere connection. *Solar Phys.*, **285** (N 1-2), 25 (2013).

5. Woch J., Gizon L. The Solar Orbiter mission and its prospects for helioseismology. *Astron. Nachr.*, **328** (N 3), 362 (2007).

A. A. Василенко

Главная астрономическая обсерватория  
Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

## КОСМИЧЕСКИЕ МИССИИ БУДУЩЕГО: ВНУТРЕННЯЯ ОБЛАСТЬ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Приводится обзор ближайших по времени запуска космических миссий для исследования внутренней области Солнечной системы, а именно «Solar Probe Plus», «Solar Orbiter», «BepiColombo», «EXOMars», а также «InSight». Их запуск запланирован на 2018—2020 гг., и каждый из них будет исследовать или Солнце, или планету земной группы. Коротко описываются предназначение и техническое оснащение космических аппаратов, планы их полёта и научные цели.

**Ключевые слова:** космические аппараты, орбита, солнечный ветер, магнитное поле Меркурия, атмосфера Марса, поверхность Марса.

A. A. Vasylenko

Main Astronomical Observatory  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## FUTURE SPACE MISSIONS: THE INNER REGION OF THE SOLAR SYSTEM

The paper deals with an overview of space missions to explore the inner region of the Solar System, the nearest on time of their launch, namely, Probe Plus, Solar Orbiter, BepiColombo, EXOMars, and InSight. Each of them will study either the Sun or the planet of the Earth group. Their launches are planned for 2018—2020. We describe briefly predestination and technical equipment of spacecraft, flight plan and scientific goal of these missions.

**Keywords:** spacecraft, orbit, solar wind, Mercury magnetic field, Martian atmosphere, Martian surface.

## 11-Й МІЖНАРОДНИЙ СИМПОЗІУМ «МАЛІ СУПУТНИКИ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗЕМЛІ»

Атмосферний озон відіграє важливу роль в регіональних та глобальних змінах клімату, приземний озон згубної наземних та супутниковых вимірюваннях розрахунок поглинання проводиться на основі експоненціального закону Бугера — Ламберта — Бера.

11-й міжнародний симпозіум «Small Satellites for Earth Observation» проводився з 24 по 28 квітня 2017 року в м. Берлін під егідою Міжнародної академії астронавтики (IAA).

Велика кількість вчених, інженерів, керівників, які взяли участь у симпозіумі, присвяченому дистанційному зондуванню Землі (ДЗЗ) із космосу, свідчить про значний інтерес до використання малих супутників, як для місій ДЗЗ, так і спеціальних місій, для випробувань нових технологій.

Міжнародний симпозіум «Small Satellites for Earth Observation», що проводиться раз на два роки, покликаний збирати спеціалістів у вказаній галузі для обговорення поточних наукових досліджень та розробок у сфері дослідження Землі із космосу за допомогою малих супутників. Тенденція розвитку малих супутників у світі є перспективною, тому що дозволяє проводити космічні експерименти доволі швидко, недорого і забезпечує більшу можливість доступу до космічних програм.

У цьому році відбувся вже 11-й симпозіум, приймаючи стороною якого виступив Національний аерокосмічний дослідницький центр Німеччини (DLR) та Технічний університет (м. Берлін).

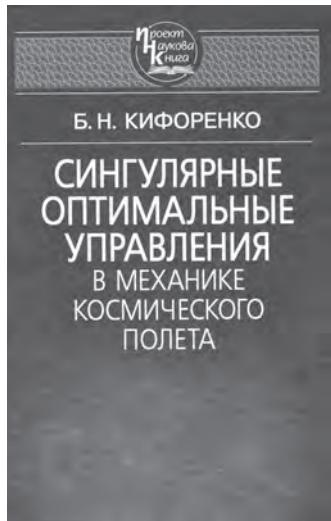
На цьогорічний симпозіум зібралися представники більш ніж 20 країн світу. Під час проведення симпозіуму представлено близько 100 усних та стендових доповідей у наступних секціях: місії, що плануються та виконуються; зв'язок; супутники типу CubeSat; нові типи платформ; силові системи супутників; програмне забезпечення. Окрема секція — конференція для студентів — дала змогу представити свої роботи студентам академічних інститутів, зокрема, слід відзначити Міжнародний університет космічних досліджень (International Space University, <http://www.isunet.edu>), в якому можуть проводити дослідження студенти з усього світу.

Впродовж роботи симпозіуму учасникам можна було познайомитись з виставкою розробок наукових і комерційних організацій. Зокрема, широко були представлені платформи типу CubeSat та системи для їх функціонування: датчики положення, системи стабілізації, бортові комп'ютери, системи передачі інформації тощо.

Представники Головної астрономічної обсерваторії НАН України та ДП «Конструкторське бюро «Південне» представили доповіді на теми розробки комплексу наукової апаратури космічного проекту «Аерозоль-UA» та супутникової платформи YuzhSat, що розробляється для вказаного проекту. Більш детальну інформацію про симпозіум можна знайти за посиланням: <https://www.dlr.de/iaa.symp/>.

Наступний симпозіум запланований на 2019 рік.

*I. I. СИНЯВСЬКИЙ*



УДК 517.977.5, 629.78

**Кифоренко Б. Н. Сингулярные оптимальные управления в механике космического полета.** — Киев: Наукова думка, 2017. — 196 с.

В монографии изложена история разработки методов исследования вырожденных вариационных задач с акцентом на механику космического полета. Описано современное состояние и обсуждены нерешенные проблемы теории сингулярных оптимальных управлений. Основное внимание удалено исследованию движения ракет в атмосфере. Показаны пути повышения эффективности ракетных двигателей. Результаты расчетов для конкретных маневров могут служить источником информации для принятия решений при конструировании перспективной ракетно-космической техники.

Для специалистов, занимающихся исследованием задач управления, а также магистрантов и аспирантов факультетов прикладной математики вузов.

**Рецензенты:** академик НАН Украины *B. M. Кунцевич*,

академик НАН Украины *M. O. Перестюк*

ISBN 978-966-00-1535-7

## ПРЕДИСЛОВИЕ

(Этюды оптимизатора)

Дорогой коллега, предлагаемая книга — плод многолетних раздумий автора над вопросами, возникавшими при использовании математической теории оптимальных процессов для решения конкретных задач.

1. Долгое время я не решался вынести на широкое обсуждение свои сомнения и находки, представить удачные, как мне казалось, результаты и поделиться вопросами, так и оставшимися без ответа. Что же побуждает меня теперь все-таки сделать этот шаг? Это чувство долга перед Провидением за три необыкновенных подарка судьбы.

Первый — тематика задач, которыми довелось мне заниматься все эти годы, — оптимизация ракет и космических аппаратов с позиций механики полета. Именно проблемы этой отрасли знания и техники в определяющей степени стимулировали развитие современной теории оптимальных процессов. Историки науки наверняка отметят эту теорию как наиболее ценное из приобретений человечества в эпоху мировой ракетно-ядерной войны второй половины двадцатого столетия, когда политики запугивали противника ядерными взрывами на собственных испытательных полигонах и демонстрировали точность доставки этих «подарков», проводя неимоверно дорогие космические исследования. Мне посчастливилось работать почти всю жизнь над реализацией мечтаний, разбуженных еще в детстве Ж. Верном и К. Э. Циolkовским, и оказаться участником развития одного из интереснейших разделов современной науки. «Не было бы счастья, да несчастье помогло» — противостояние, побудившее исследовать космос задолго до решения более насущных планетарных задач.

Второй, но, безусловно, главный по влиянию на мою судьбу подарок — мои учителя: доцент Михаил Григорьевич Старостин и профессор Всеволод Иосифович Путятия, сумевшие убедить стоявшего на распутье студента Киевского университета в том, что исследовательская работа — это и есть то, чем стоит заниматься в жизни. Основное влияние на формирование моих интересов к механике космического полета оказал заведующий 20-м отделением Центрального аэрогидродинамического института им. Н. Е. Жуковского, профессор МФТИ Георгий Львович Гродзовский. Он привлек меня к решению первой серьезной задачи механики космического полета, ввел в сообщество ученых, работавших в этой отрасли, и долгие годы влиял на выбор направлений моих исследований.

Третий — это книга, которую я пишу в эти дни. Я не могу сказать, что это моя первая книга, потому что я написал в свое время несколько научных монографий, но это моя первая книга, написанная для широкой аудитории. Я надеюсь, что она будет полезна для всех, кто интересуется космической наукой и техникой.

Третий подарок Провидения — это, хотя и не широкий, но очень дорогой для меня круг коллег, с которыми довелось неоднократно обсуждать разные проблемы, в частности вопросы, размышления над которыми составили содержание этой книги. Хочу перечислить их не по степеням и званиям, а в порядке моей личной хронологии встреч: А. Н. Гузь, Ю. И. Шмаков, С. И. Кифоренко, В. В. Кузьменко, З. В. Пасечник, Н. А. Перестюк, В. Т. Злацкий, В. В. Токарев, Ю. Н. Иванов, Р. Н. Овсянников, А. И. Кухтенко, В. Б. Ларин, Б. Н. Пшеничный, В. М. Ковтуненко, Ж. П. Марек, К. Маршаль, Т. М. Энеев, В. В. Балашов, В. А. Егоров, В. В. Белецкий, В. Г. Дёмин, Ф. Л. Черноусько, Г. К. Даулетов, Е. А. Хасенов, В. Ф. Кротов, Л. И. Гусев, Г. К. Григорьев, Г. А. Багнюк, В. С. Брусов, В. М. Кунцевич, Ф. М. Кириллова, Р. Ф. Габасов, Ю. М. Горский, И. Ю. Васильев, А. М. Харитонов, С. В. Василенко, В. Д. Юдицкий, Н. Н. Моисеев, Д. В. Лебедев, М. М. Лычак, В. В. Волосов, Я. И. Зелик, Г. М. Зражевский. Сюда же отнесу свою переписку с А. Миеле и Г. Келли и интенсивный недельный поистине марафонский обмен мнениями с сотрудниками Advanced Space Analysis Office при посещении НАСА (центр им. Льюиса в Кливленде, шт. Огайо).

Очень жаль, если те особенности разработки и использования оптимизационных подходов, с которыми мне довелось иметь дело, останутся разбросанными в разрозненных публикациях или вообще не представленными на более надежном носителе информации, чем личная память автора и его собеседников, некоторых из которых, увы, уже нет с нами. Надеюсь, что преломившийся в моем сознании опыт, опыт поколения оптимизаторов второй половины прошлого века, будет интересен и для моих коллег, и для молодежи, вступающей в жизнь в очень сложную эпоху всеохватывающей и подчас бездумной экспансии формализованных описаний и количественных методов.

В сущности, предлагаемая книга — о том, какие задачи удавалось, а какие невозможно было решить методами оптимизации. И как попытаться переформулировать вторые, чтобы сделать их разрешимыми. А то, что это иллюстрируется примерами исключительно из истории механики космического полета, для читателя, интересующегося методологическими аспектами науки, надеюсь, не столь уж и важно. Ведь еще Г. Гегель утверждал, что изучение истории философии — не пустое коллекционирование фактов и анекдотов, не рассмотрение совокупности взглядов, а постижение сути философии.

Всем сказанным я пытаюсь оправдывать перед тобой, читатель (и перед собой — в первую очередь!), стремление изложить представленное в этой книге. Сомнения в целесообразности этого шага по-прежнему не оставляют меня. Г. Л. Гродзовский, увидев слово «попытка» в черновике автореферата моей кандидатской

диссертации, возмутился: «Вместо того, чтобы делать попытки, полезнее для общества торговать пивом!». Да, мне никогда не хватало его решительности. Но пригласить тебя, читатель, поразмышлять над превратностями моделирования и оптимизации все-таки рискну. И если что-либо из затронутого в книге тебе не безразлично, буду рад расширить круг собеседников и обсудить в любой форме возможные замечания и пожелания.

2. Основная проблема, которую я намерен обсуждать, — это выбор разумной меры соответствия объекта исследования его математической модели. Поскольку стремление сделать описание возможно более подробным неизбежно приводит к усложнению используемого при этом математического аппарата, необходимость лавирования между Сциллой неадекватности и Харибдой нелинейности, неаналитичности и проклятия размерности требует от исследователя немалого искусства. В отличие от науки возможности искусства безграничны, но не формализуемы. Однако сформулировать некий опытный принцип разрешения дилеммы: адекватность — простота формализованного описания — я все же попытаюсь, надеясь вызвать дискуссию заинтересованных читателей.

3. Перечислю кратко обсуждаемые в книге проблемы механики полета. В первой главе приведен краткий очерк истории формирования современного математического описания ракет и космических аппаратов (КА) как объектов управления. Во второй, третьей и четвертой главах рассмотрены проблемы оптимизации ракет, движущихся в атмосфере. На примере классической задачи Годдарда — Циолковского уточняются условия оптимальности сингулярного управления величиной тяги и зависимость эффективности ее дросселирования от степени совершенства конструкции двигателя и аэrodинамики корпуса ракеты. Оказывается, что житейская мудрость «Тише едешь — дальше будешь» реализуется при движении тела переменной массы в среде с сопротивлением просто-таки буквально, в то время как тезис «Сила есть — ума не надо» абсолютно неприменим в столь тонком деле, как конструирование ракет.

Оптимальная даже в задаче Годдарда — Циолковского степень дросселирования тяги может быть настолько значительной, что становится неправомерным использование классического представления о прямой пропорциональности величины тяги и секундного массового расхода рабочего тела. В четвертой главе предложена более адекватная модель ракетного двигателя как объекта управления — и изящное классическое решение, обусловившее разработку современной теории особых оптимальных управлений, рушится, как карточный домик. Возникший взамен фантом оптимального скользящего режима для ра-

кетного двигателя есть «дитя незаконнорожденное», поскольку противоречит одной из основополагающих гипотез теории оптимального управления. Выход из теоретического тупика и возможные практические последствия обсуждаются в четвертой главе. Там же рассмотрены особенности управления движением аппаратов, не только преодолевающих аэродинамическое сопротивление, но и использующих аэродинамическую или аэростатическую подъемную силу, включая задачу доставки образцов грунта с поверхности планеты Венера.

В пятой главе рассмотрена классическая задача оптимизации многоступенчатых ракет в новой постановке — и выясняется, стоит ли рубить сук, на котором сидишь. Если идея сброса отработанных топливных баков достаточно тривиальна, то имеет ли смысл сбрасывать секции двигателя, явно теряя при этом в ускорении? Полученный ответ не только удовлетворяет естественное любопытство, но и подсказывает способ улучшения уже привычной компоновки схем пакетных разгонных ступеней ракет и возможности экономии топлива уже существующих ракет.

В шестой главе обсуждается основная дилемма математического моделирования: адекватность-простота формализованного описания. Предложенный прием используется при построении математической модели жидкостного ракетного двигателя, работающего на двухкомпонентной топливной смеси, электрического ракетного двигателя с солнечным источником энергии, ядерного ракетного двигателя большой тяги и двухрежимного ядерного ракетного двигателя. Для всех указанных типов двигателей доказано, что управление величиной тяги, удовлетворяющие необходимым условиям оптимальности, принадлежат дуге границы множества допустимых управлений от точки максимальной тяги до точки максимальной скорости реактивной струи. Это утверждение инвариантно относительно целей и оценки качества управления в конкретных задачах.

Естественным, на мой взгляд, следствием долголетних мытарств автора на пройденном пути, сухим остатком неоднократных всплесков активности и погружений в омыты безысходности явились в целом оптимистическая оценка возможности использования оптимизационной

идеологии не только как способа совершенствования технических объектов, но и как источника идей расширения инструментария формализованного описания процессов управления в живой природе, к которой технические объекты, как созданные человеком, имеют прямое отношение.

Такого же, склонившегося над этими страницами с карандашом в руке, видят в своем воображении автор? Я жду внимания от тех специалистов-механиков, кому интересна логика развития представления о ракете как объекте управления, формализованного в виде последовательно усложняющейся системы математических моделей. Готовлюсь дискутировать с интересующимися эффективностью и ограниченностью возможностей оптимизации как инструмента действительного улучшения функционирования управляемых объектов любой природы, приемлемой моделью которых является динамическая система, описываемая обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Материалы, вошедшие в книгу, в течение ряда лет включались в специальные курсы для студентов и аспирантов механико-математического факультета Киевского национального университета им. Тараса Шевченко. Если для некоторых читателей стиль изложения покажется слишком подробным, то это сделано не для увеличения объема, а с учетом интересов преподавателей, которые желали бы включить какие-либо задачи в свои лекции для иллюстрации искусства моделирования и возможностей оптимизации при решении практических задач.

Особенно хотелось бы пообщаться и выслушать критические замечания читателей, которым (вслед за Н. Н. Моисеевым) покажется наиболее интересной последняя, методологическая, часть приложений и, в частности, дискуссионная возможность использования предложенного в ней принципа Анохина — Панетто при описании объектов живой природы.

Если эта книга попадет в руки делающего первые шаги в науке и мне удастся пробудить в молодой душе интерес к научным исследованиям как способу жизнедеятельности, я буду считать свой долг перед Прорицанием исполненным и десятилетия увлечения оптимизацией ракет и космических аппаратов не потраченными зря.

## Наші автори

---

**БЕЙКЕР Роберт М. Л.** — доктор філософії, член Американської асоціації сприяння розвитку науки, провідний експерт з досліджень високочастотних гравітаційних хвиль (HFGW), голова трьох міжнародних конференцій з досліджень високочастотних гравітаційних хвиль, засновник веб-сайта з досліджень гравітаційних хвиль [www.GravWave.com](http://www.GravWave.com), співпрацює з корпорацією Consultancy Transport Sciences, працює старшим консультантом корпорації «Транспортні науки» і наукового товариства «Гравітаційні хвилі». Лауреат премії Університету Каліфорнії з фізики і премії Дірка Брауера за видатний внесок у астродинаміку та орбітальну механіку.

Напрям науки — високочастотні гравітаційні хвилі, астродинаміка, орбітальна механіка.

**БРИЛЬ Андрій Іванович** — провідний науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук Білорусі, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика атмосфери, оптичне зондування атмосфери.

**ВАВИЛОВА Ірина Борисівна** — завідувач відділу позагалактичної астрономії та астроінформатики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук, доцент. Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — позагалактична астрономія, космічні дослідження, історія науки, астроінформатика.

**ВАСИЛЕНКО Анатолій Андрійович** — науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — позагалактична астрономія, астрофізика високих енергій.

**ДАНИЛЕВСЬКИЙ Василь Олексійович** — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика атмосфери, астрономія.

**КАБАШНІКОВ Віталій Павлович** — головний науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук Білорусі, Мінськ, Білорусь, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика атмосфери, обладнання для досліджень параметрів атмосфери.

**КАЗАНЦЕВ Анатолій Михайлович** — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — еволюція малих тіл Сонячної системи.

**КАЗАНЦЕВА Лілія Вікторівна** — науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — еволюція малих тіл Сонячної системи.

**МЕТЕЛЬСЬКА Наталія Сергіївна** — старший науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук Білорусі, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика атмосфери, моделювання параметрів атмосфери.

**МІЛНЕВСЬКИЙ Геннадій Петрович** — завідувач науково-дослідної лабораторії кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, головний науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, співробітник Міжнародного центру науки майбутнього Цзілінського університету (Чанчунь, Китай), доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика атмосфери та навколоземного космічного простору.

**НОРКО Анна Володимирівна** — інженер Інституту фізики Національної академії наук Білорусі.

Напрям науки — фізика атмосфери, моделювання параметрів атмосфери.

**РОМАНЕЦЬ Олена** — Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, кандидат історичних наук.

Напрям науки — історія фізики.

**САВЧУК Варфоломей** — професор кафедри квантової макрофізики факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара, доктор історичних наук, кандидат біологічних наук. Академік Академії наук вищої школи України (1998), Заслужений працівник освіти України.

Напрям науки — історія науки, освіти і техніки.

**СИНЯВСЬКИЙ Іван Іванович** — виконувач обов'язків завідувача відділу оптики атмосфери та приладобудування Головної астрономічної обсерваторії НАН України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — оптика атмосфери, приладобудування.

**ТКАЧЕНКО Олександр Іванович** — старший науковий співробітник Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій і систем Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, доктор технічних наук.

Напрям науки — навігація та керування рухомими об'єктами.

**ФЕДОРЕНКО Юрій Петрович** — старший науковий співробітник кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедицинської електроніки та комп'ютерних систем, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — розробка і розвиток радіофізичних методів діагностики іоносфери, дослідження іоносферних збурень.

**ЧАЙКОВСЬКИЙ Анатолій Павлович** — завідувач Центру «Оптичне дистанційне зондування» Інституту фізики Національної академії наук Білорусі, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика атмосфери, оптичне зондування атмосфери.

**ЯЦКІВ Ярослав Степанович** — директор Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, член Президії Національної академії наук України, академік Національної академії наук України, президент Української астрономічної асоціації, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — астрономія, геодинаміка, космічні дослідження.